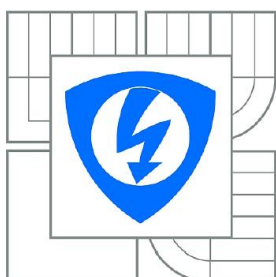


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

UNIVERZÁLNÍ PŘESNÉ USMĚRŇOVAČE S PROUDOVÝMI AKTIVNÍMI PRVKY

UNIVERSAL ACCURATE RECTIFIERS WITH CURRENT ACTIVE ELEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

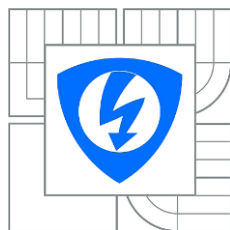
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ RYŠAVÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ LANGHAMMER

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Lukáš Ryšavý
Ročník: 2

ID: 119594
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Univerzální přesné usměrňovače s proudovými aktivními prvky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se v literatuře se známými obvodovými realizacemi univerzálních přesných usměrňovačů a to zejména s těmi s proudovými aktivními prvky. Na základě těchto zapojení navrhnete nová obvodová řešení. Jejich vlastnosti ověřte pomocí počítačových simulací a experimentálním měřením praktickou realizací do podoby DPS. Proveďte srovnání stěžejních vlastností dřívějších a nově navržených obvodů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GIFT, S. J. G., MAUNDY, B.: „Versatile Precision Full-Wave Rectifiers for Instrumentation and Measurements,“ IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 56, pp. 1703-1710, 2007.
[2] HAYATLEH K., PORTA S. LIDGEY F. J.: Temperature independent current conveyor precision rectifier. IEE 1994, Electronics Letters Online No: 199414.54.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 29.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Langhammer

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ANOTACE

V rámci této práce je navrženo několik nových obvodových řešení univerzálních přesných usměrňovačů s proudovými aktivními prvky. Na základě znalostí proudových aktivních prvků, univerzálních přesných usměrňovačů a nežádoucích vlivů na tyto obvody jsou navržena nová obvodová řešení, která jsou poté simulována a porovnávána se známými zapojeními přesných usměrňovačů. Nakonec jsou realizována dvě navrhovaná řešení včetně dvou původních obvodů z nichž bylo vycházeno, experimentálně naměřeny a verifikovány jejich vlastnosti. Hlavním aktivním prvkem v původních obvodech jsou OPA nebo THS, v navrhovaných obvodech jsou použity OPA a THS, tak univerzální proudový konvektor (UCC), který nabízí širokou škálu aplikačního využití a realizování různých variant aktivních proudových prvků.

Klíčová slova

proudový konvektor, závěrná zotavovací doba diody, operační transkonduktační zesilovač, univerzální přesný usměrňovač, aktivní prvek, UCC

ABSTRACT

In this thesis new circuit solutions of universal precision rectifiers with current active elements are proposed. Based on the knowledge of current active elements, universal precision rectifiers and adverse impacts on these circuits new circuit solutions are proposed. These circuits are then simulated and compared with the known circuits of precision rectifiers. In conclusion two original circuits and two proposed circuit solutions based on original ones are implemented, their properties are experimentally measured and their function are verified. The main active element in the original circuit are the OPA or THS, the proposed circuits are used the OPA and THS and the universal current conveyor, which offers a wide range of application use and realization of different variations of active current elements.

Keywords

current conveyor, diode reverse recovery time, operational transconductance amplifier, universal precision rectifier, active element, UCC

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

RYŠAVÝ, L. *Univerzální přesné usměrňovače s proudovými aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 89 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Langhammer.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „**Univerzální přesné usměrňovače s proudovými aktivními prvky**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(-a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(-a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(-a) následku porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonu (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne.....

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Lukáši Langhammerovi za velmi užitečnou metodickou pomoc, vedení k velmi dobré obsahové stránce a cenných rad při zpracování diplomové práce.

V Brně dne.....

.....
podpis autora



Faculty of Electrical Engineering
and Communication

Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno, Czechia

<http://www.six.feec.vutbr.cz>

Výzkum popsáná v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

ÚVOD	8
1 PROUDOVÉ AKTIVNÍ PRVKY	9
1.1 Proudový konvektor	9
1.1.1 Obecný proudový konvektor	10
1.1.2 Univerzální proudový konvektor	11
1.2 Proudový sledovač	12
1.3 Proudový zesilovač	14
1.4 Operační transkonduktanční zesilovač	15
2 VLIV ZÁVĚRNÉ ZOTAVOVACÍ DOBY DIODY	17
3 EXISTUJÍCÍ ZAPOJENÍ PŘESNÝCH DVOUCESTNÝCH USMĚRŇOVAČŮ	20
3.1 Univerzální přesný dvoucestný usměrňovač	20
3.1.1 Přesný usměrňovač se dvěma OZ	20
3.1.2 Přesný usměrňovač s OZ a CCII+	22
3.1.3 Přesný usměrňovač se dvěma OZ a CCII+	24
3.2 Upravený univerzální přesný dvoucestný usměrňovač	26
3.2.1 Upravená varianta přesného usměrňovače se dvěma OZ	26
3.2.2 Upravená varianta přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+	28
3.3 Vysokofrekvenční přesný dvoucestný usměrňovač	30
4 SIMULACE NAVRHOVANÝCH OBVODŮ	33
4.1 První navrhovaný obvod	33
4.2 Druhý navrhovaný obvod	37
4.3 Proudový zdroj	41
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VERIFIKACE VÝSLEDKŮ REALIZOVANÝCH OBVODŮ	42
5.1 Experimentální měření	42
5.1.1 První původní obvod	46
5.1.2 Druhý původní obvod	49
5.1.3 První navrhovaný obvod s UCC	52
5.1.4 Druhý navrhovaný obvod s UCC	58

5.2	Verifikace výsledků.....	64
6	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN	72
	SEZNAM PŘÍLOH	73

ÚVOD

V řadě analogových obvodů se využívá aktivních prvků, které zpracovávají signál na svých svorkách využívající napěťového, proudového nebo smíšeného módu. Takovými prvky mohou být operační zesilovač, proudový sledovač, proudový nebo napěťový konvektor, operační transkonduktanční zesilovač nebo složitější vícebranové prvky. S těmito prvky bylo navrženo mnoho obvodových variant frekvenčních filtrů, oscilátorů a přesných usměrňovačů za účelem snahy docílit snížení energetické náročnosti, rozšíření měřené šířky pásma, zvýšení odstupu signálu od šumu a menšího vlivu parazitujících vlastností nelineárních součástek v obvodu. Současným trendem je vhodné zavádění aktivních prvků pracujících v proudovém nebo smíšeném režimu, které umožňuje lepší vlastnosti zpracování analogového signálu. Aby se dosáhlo co největší efektivity využívaných aktivních prvků, a tím pádem i snížení jeho počtu v obvodu, byl v této práci použit z ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně univerzální proudový konvektor (UCC).

První kapitola se zabývá teoretickým rozбором proudových aktivních prvků jako jsou proudový sledovač, proudový zesilovač, operační transkonduktanční zesilovač a obzvláště proudový konvektor, se kterým budu pracovat, konkrétně s univerzálním proudovým konvektorem (UCC). Druhá kapitola rozebírá vliv závěrné zotavovací doby polovodičové diody jako nežádoucí vlastnosti projevující se u obvodů univerzálních přesných usměrňovačů. Třetí kapitola popisuje známá zapojení univerzálních přesných dvoucestných usměrňovačů, kde jsou vidět jednotlivé nasimulované charakteristiky. Ve čtvrté kapitole byla navržena nová obvodová řešení s použitím univerzálního proudového konvektoru (UCC), která jsou poté nasimulována. V páté kapitole jsou realizovány přípravky dvou původních obvodů a dvou nových navrhovaných obvodů vycházející ze simulací. Na těchto přípravech jsou provedena experimentální měření výstupních dvoucestně usměrněných signálů a převodových charakteristik, kde jsou poté podrobně popsána verifikace výsledků těchto obvodů. Na závěr jsou porovnány a vyhodnoceny vlastnosti nově navrhovaných obvodových řešení přesných dvoucestných usměrňovačů.

1 PROUDOVÉ AKTIVNÍ PRVKY

Současným trendem v analogové technice je snižovat napájecí napětí, mít dostatečnou rychlost zpracování signálu a velkou frekvenční šířku pásma, ideálně prvky frekvenčně nezávislé. To ovlivňuje nová elektronická zařízení pro velkou řadu aplikací pozitivně, ale také negativně. Mezi negativními vlastnostmi patří malý odstup signálu od šumu (např.: vzájemné rušení) a parazitující vlastnosti dané nelineární součástky.

Proto se zavádí aktivních prvků, které mají těmito negativním vlastnostem nejlépe zabránit nebo alespoň nejvíce omezit jejich vliv. Tyto aktivní prvky můžeme rozdělit do třech typů podle jejich pracovního chování: proudový mód, napěťový mód a smíšený mód. Má práce se bude hlavně zabývat aktivními prvky pracující v proudovém módu. Mezi proudové aktivní prvky patří proudový konvektor (CC), operační transkonduktační zesilovač (OTA), proudový sledovač (CF), proudový zesilovač (CA) a jiné.

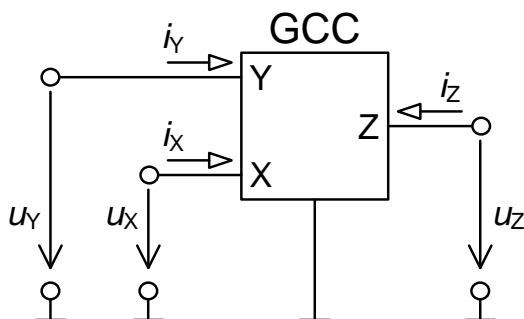
Zapojení obsahující aktivní prvky s proudovým módem mají výhodu v tom, že dokáží zpracovávat signál v širokém frekvenčním pásmu. Také mají větší dynamický rozsah, tzn. lze splnit dostatečný odstup signálu od šumu při nízkých hodnotách napájecího napětí, což v případě napěťového módu nelze [7].

1.1 Proudový konvektor

První zmínka o proudovém konvektoru (CC – Current Conveyor) sahá do roku 1968, kdy prezentovali Smith a Sedra konvektor první generace (CCI) [13]. Později roku 1970 představili Smith a Sedra konvektor druhé generace (CCII) [12], který nabízí možnosti širšího uplatnění jakožto stavebního aktivně proudového prvku. Jeho modifikace CCII+ a CCII– nachází mnohá uplatnění v elektrotechnice, elektronice a výzkumné činnosti. Výsledkem výzkumu bylo roku 1995 představení proudového konvektoru třetí generace (CCIII) [4]. Od té doby vznikají další modifikace a zlepšení proudového konvektoru, jako např.: CCIII+ a CCIII–, invertující varianty druhé generace pod označením ICCII+ a ICCII– [1], čtyřbranové proudové konvektory CCII+/- [3] a jiné. Tyto proudové konvektory obsahují zdroje napětí a zdroje proudů řízené vstupními napětími a proudy (VCVS a CCCS). Snahou bylo docílit univerzálního proudového konvektoru, který by dokázal realizovat všechny generace a varianty proudových konvektorů. Proto na FEKT VUT v Brně byla navržena koncepce univerzálního proudového konvektoru (UCC) pod optimalizovaným označením UCC–N1B [20].

1.1.1 Obecný proudový konvektor

Chováním proudového konvektoru lze popsat obecným proudovým konvektorem (GCC – General Current Conveyor) [2]. Jeho schématická značka je na Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Schématická značka obecného proudového konvektoru.

Vstupní brána Y je napěťová, vstupní brána X je proudová a výstupní brána je Z. Funkci obecného proudového konvektoru, kde koeficienty a , b , c označují jednotlivé přenosy mezi svorkami GCC, popisuje matice (1.1) [2]:

$$\begin{bmatrix} u_X \\ i_Y \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_X \\ u_Y \\ u_Z \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

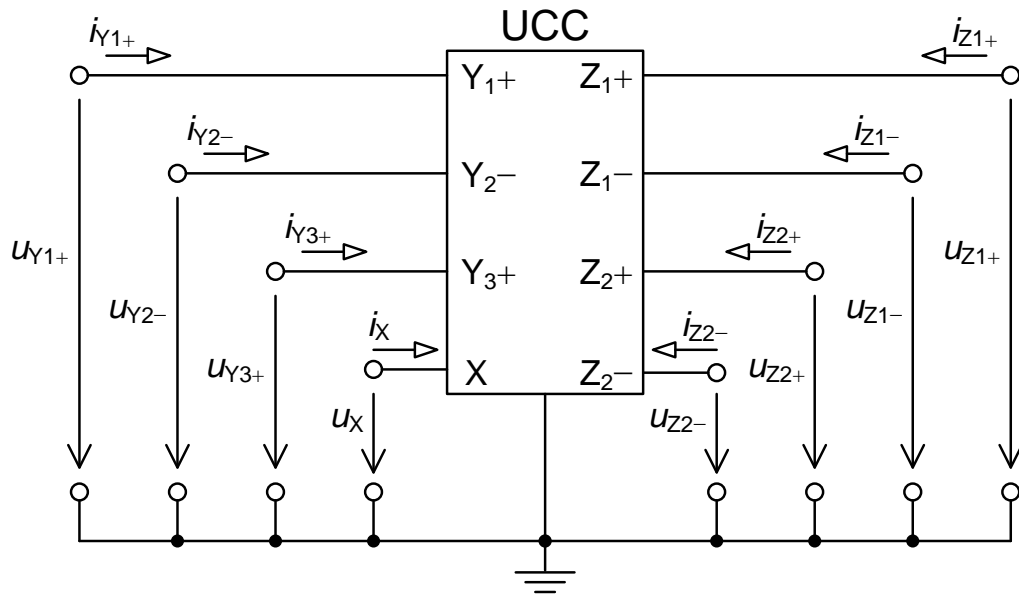
Z výše popsané matice (1.1) představuje koeficient a napěťový přenos mezi svorkami Y a X a jeho obor může nabývat hodnot $\{-1;1\}$, koeficient b proudový přenos mezi svorkami X a Y a jeho obor může nabývat hodnot $\{-1;0;1\}$ a koeficient c napěťový přenos mezi svorkami X a Z a jeho obor může nabývat hodnot $\{-1;1\}$. Z toho tedy vyplývá, že volbou hodnot z daných množin vytvoříme kombinaci různých proudových konvektorů pro vhodné typy obvodů, kde jeho přehled parametrů je vidět v Tab. 1.1.

Tab. 1.1: Koeficienty obecného proudového konvektoru.

Koeficienty z matice	Hodnota parametru		
	1	0	-1
a	Neinvertující	□	Invertující
b	I. generace	II. generace	III. generace
c	Kladný přenos	□	Záporný přenos

1.1.2 Univerzální proudový konvektor

Tento univerzální proudový konvektor pod označením UCC–N1B [18] dle návrhu ÚTKO FEKT VUT byl vyroben ve firmě AMI Semiconductor technologií CMOS 0,35 μm . Do pouzdra UCC byl přidán jednoduchý CCII+/-, jenž je základním blokem vnitřního obvodu UCC a zároveň měl širší aplikační využití. Navrženým obvodem UCC, jehož schématická značka je na Obr. 1.2, lze realizovat všemožné varianty proudových konvektorů vycházející z definice GCC a také neznámé typy CC [18].



Obr. 1.2: Schématická značka univerzálního proudového konvektoru.

Svorky Y_{1+} , Y_{2-} , Y_{3+} jsou napěťové vstupy, svorka X je proudový vstup. Svorky Z_{1+} a Z_{2+} jsou proudové výstupy s kladným přenosem proudu, svorky Z_{1-} a Z_{2-} jsou proudové výstupy se záporným přenosem proudu ze svorky X . Funkci UCC popisuje hybridní matice [18]

$$\begin{bmatrix} i_{Y1+} \\ i_{Y2-} \\ i_{Y3+} \\ u_X \\ i_{Z1+} \\ i_{Z1-} \\ i_{Z2+} \\ i_{Z2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Y1+} \\ u_{Y2-} \\ u_{Y3+} \\ i_X \\ u_{Z1+} \\ u_{Z1-} \\ u_{Z2+} \\ u_{Z2-} \end{bmatrix}. \quad (1.2)$$

Variabilita UCC umožňuje podle hybridní matice (1.2) vytvořit všechny tři generace proudových konvektorů a též vícevstupové proudové konvektory.

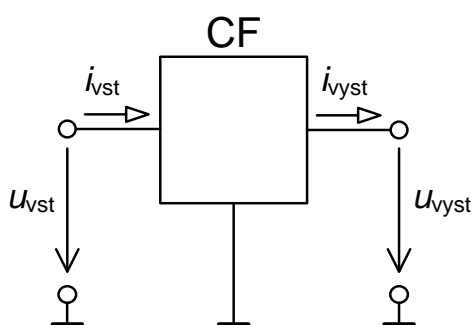
První generaci realizujeme tak, že vstupem Y_{1+} dostaneme neinvertující proudové konvektory nebo vstupem Y_{2-} invertující proudové konvektory. Svorka X se použije jako proudový vstup. K dispozici máme čtyři výstupy, kde se musí propojit jeden pozitivní proudový výstup Z_{1+} nebo Z_{2+} na použitý napěťový vstup Y_{1+} nebo Y_{2-} v závislosti, zda se jedná o neinvertující nebo invertující proudový konvektor. Nepoužité svorky se uzemní.

Druhá generace se realizuje jednodušeji oproti první generaci, kde není třeba propojovat žádný proudový výstup na napěťový vstup, jinak je zbylý postup stejný.

Třetí generace se realizuje tak, že propojíme jeden negativní výstup Z_{1-} nebo Z_{2-} na použitý napěťový vstup Y_{1+} nebo Y_{2-} s ohledem na to, zda chceme neinvertující nebo invertující proudový konvektor.

1.2 Proudový sledovač

Proudový sledovač (CF – Current Follower) [11], znázorněn schématickou značkou na Obr. 1.3, je jednoduchý prvek, který pracuje s proudem na vstupu a výstupu. Tyto prvky jsou využívány ve filtračních obvodech díky své jednoduché vnitřní struktuře a tím možnosti dosahovat velké šířky pásma.

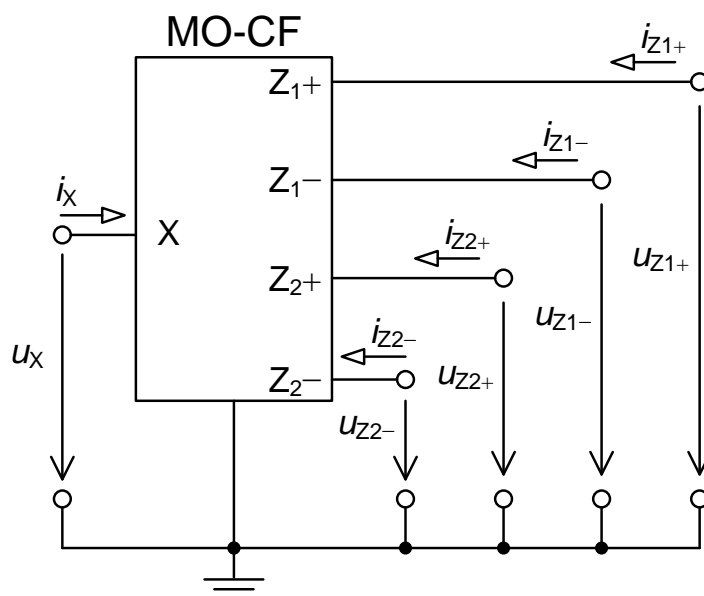


Obr. 1.3: Schématická značka proudového sledovače.

Chování vstupního proudu a výstupního proudu popisuje matice [11]

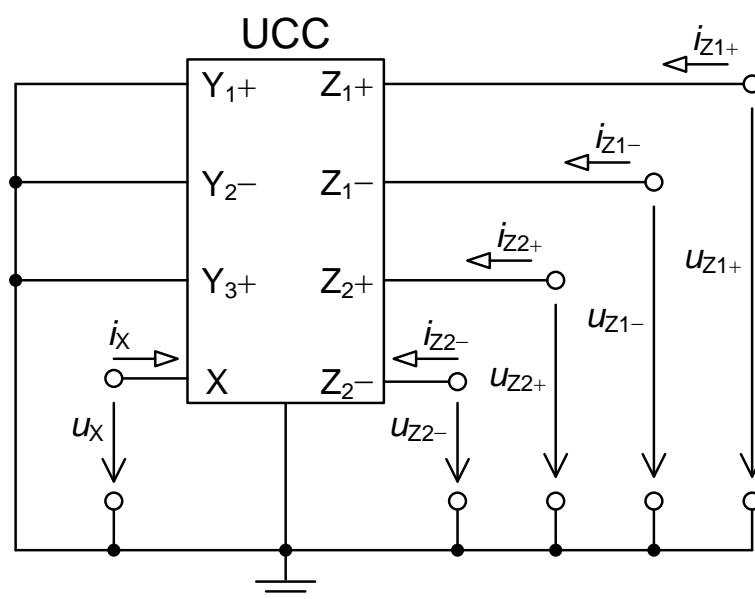
$$\begin{bmatrix} u_{vst} \\ i_{vyst} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{vyst} \\ i_{vst} \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Použitím proudového módu lze dosáhnout nízkého počtu aktivních prvků v obvodu za situace, kdy aktivní prvek má více výstupů. Což v případě proudového sledovače dochází k variantám se dvěma výstupy (DO-CF – Dual-Output Current Follower) [21] nebo více výstupy (MO-CF – Multiple-Output Current Follower) [15], jenž na Obr. 1.4 je znázorněna schématická značka MO-CF se čtyřmi výstupy.



Obr. 1.4: Schématická značka proudového sledovače se čtyřmi výstupy.

Jelikož proudové sledovače nejsou na trhu dostupné jako samostatné obvody, řešením je využití obvodu UCC-N1B pro vytvoření varianty MO-CF [9] na Obr. 1.5. Vzhledem k vlastnostem UCC je tento model vhodný jen k základnímu ověření.



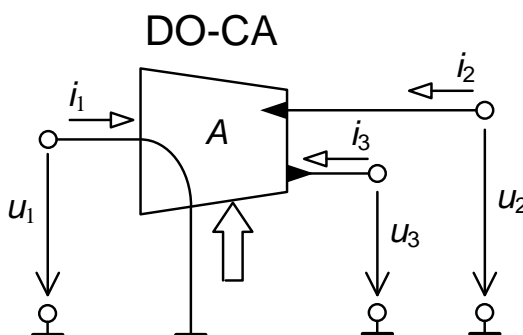
Obr. 1.5: Vytvoření MO-CF za pomoci UCC.

Chování modelů z Obr. 1.4 a Obr. 1.5 popisuje hybridní matice

$$\begin{bmatrix} u_x \\ i_{z1+} \\ i_{z1-} \\ i_{z2+} \\ i_{z2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_x \\ u_{z1+} \\ u_{z1-} \\ u_{z2+} \\ u_{z2-} \end{bmatrix}. \quad (1.4)$$

1.3 Proudový zesilovač

Proudový zesilovač (CA – Current Amplifier) [14] je specifický tím, že mění okamžitou hodnotu vstupního proudu, kde výsledný výstupní proud je zpravidla zesílen, v některých případech i utlumen. Schématická značka na Obr. 1.6 značí obecnou variantu proudového zesilovače s jedním vstupem a dvěma výstupy s blíže nespecifikovaným řízením [7].



Obr. 1.6: Schématická značka prvku DO-CA.

Jako u proudových sledovačů jsou všechny svorky proudového zesilovače DO-CA proudové a chování modelu z Obr. 1.6 popisuje hybridní matice [7]

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ A & 0 & 0 \\ -A & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

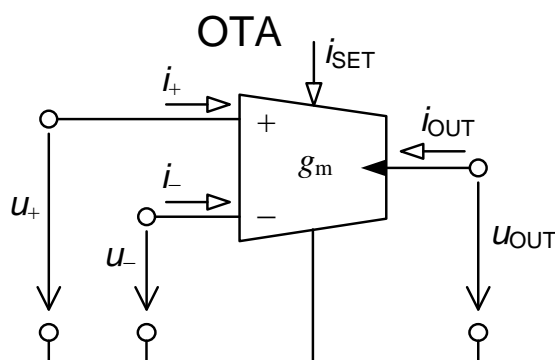
Proudové zesilovače můžeme rozdělit na základě dvou kritérií [7]: způsobu řízení proudového zesílení a počtem vstupních a výstupních svorek. Hlavní problém spočívá v proudovém zesílení a definici proudu, který je zesilován. Nekonečného proudového zesílení není z technologického hlediska možné dosáhnout, protože koncepce proudového zesílení jsou postaveny na konečném zesílení. Toto konečné zesílení lze

měnit v typickém intervalu ± 1 až ± 10 a lze jej měnit buď plynule v daném rozmezí intervalu prostřednictvím řídicího proudu nebo digitálně s omezeným počtem hodnot zesílení, které jsou jasné definovány a mohou být optimalizovány.

V letech 2008–2010 na pracovišti ÚTKO FEKT VUT v Brně ve spolupráci se společností ON Semiconductor vznikl digitálně říditelný proudový zesilovač s diferenčním vstupem a výstupem (DACA – Digitally Adjustable Current Amplifier), více o tomto prvku se dočtete v [10].

1.4 Operační transkonduktanční zesilovač

Operační transkonduktanční zesilovač (OTA – Operational Transconductance Amplifier) [17] bývá hojně využíván při návrhu analogových struktur. OTA není sice čistě proudovým aktivním prvkem, ale jeho aplikace do obvodu bývá samostatně nebo v kombinaci s proudovými sledovači pracující v proudovém módu. OTA prvek s nastavitelnou transkonduktancí g_m pomocí proudu i_{SET} , zobrazený schématickou značkou na Obr. 1.7, se využívá převážně pro přeladitelné filtry, ale může být také využit pro usměrňovače, budiče, oscilátory, rozdílové zesilovače, apod.



Obr. 1.7: Schématická značka operačního transkonduktančního zesilovače.

Chování obvodu z Obr. 1.7 popisuje matice (1.6) [17] jako poměry mezi napěťovými bránami a proudovou bránou

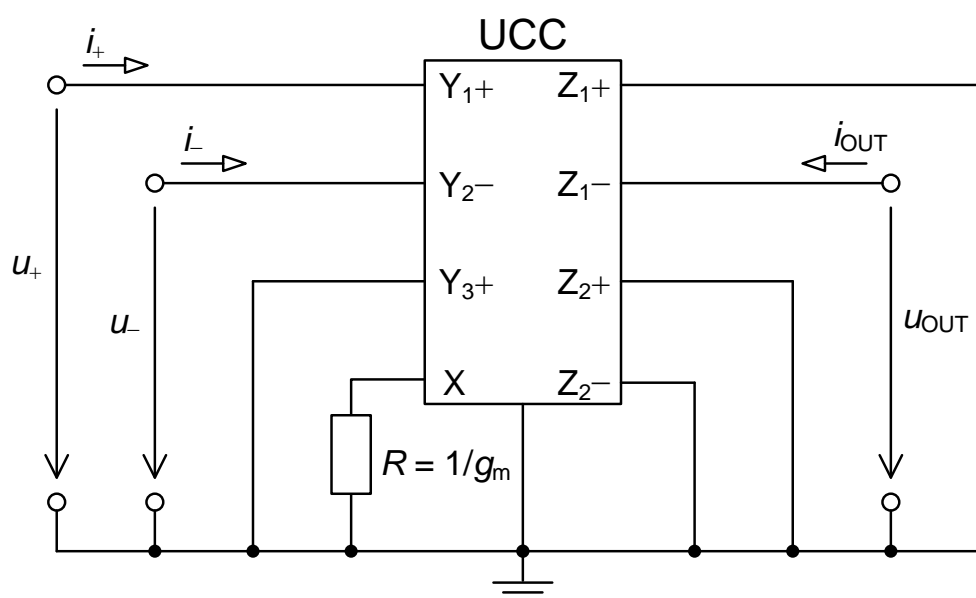
$$\begin{bmatrix} i_+ \\ i_- \\ i_{OUT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -g_m & g_m & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_+ \\ u_- \\ u_{OUT} \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Ideální operační transkonduktanční zesilovač (OTA) je napětím řízený zdroj proudu (VCCS – Voltage-controlled Current Source), kde jeho transkonduktance g_m je hlavním parametrem a z matice (1.6) je možné odvodit princip modelu daný vztahem [17]

$$i_{OUT} = g_m \cdot (u_+ - u_-), \quad (1.7)$$

kde jsou napětí u_+ na neinvertujícím a napětí u_- na invertujícím vstupu OTA vztažené proti zemi. Podle schématické značky na Obr. 1.7 a rovnice (1.7) lze usoudit, že ideální operační OTA má konečnou, frekvenčně nezávislou transkonduktanci g_m a jeho vstupní i výstupní impedance jsou teoreticky nekonečné.

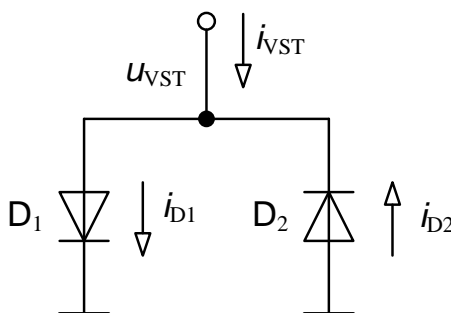
Prvek operačního transkonduktančního zesilovače je možné také realizovat pomocí UCC [7], [8], jak ukazuje Obr. 1.8. Mezi dalšími typy OTA jsou vícevýstupové prvky jako BOTA (dvouvýstupové) a MOTA (vícevýstupové).



Obr. 1.8: Možné vytvoření OTA za pomoci UCC.

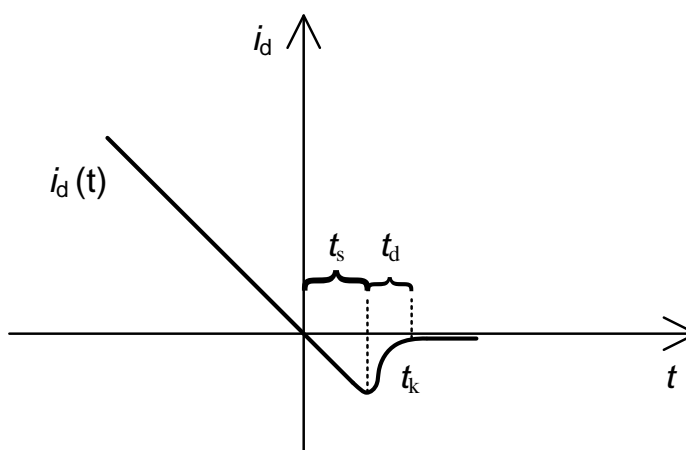
2 VLIV ZÁVĚRNÉ ZOTAVOVACÍ DOBY DIODY

V dosud navržených obvodech přesných usměrňovačů jsou diody buzené proudem za pomoci podobvodu se dvěma diodami [19] uvedeném na Obr. 2.1, jenž mají vliv na výslednou usměrňenou charakteristiku obvodu.



Obr. 2.1: Základní varianta podobvodu se dvěma diodami buzené proudem.

Na proudovém výstupu aktivního prvku bývá tento podobvod připojen a podle polarity proudy rozdělí proud i_{VST} do jedné ze dvou větví. Pokud bychom vybudili harmonickým signálem výše zmíněný podobvod, získáme průběhy proudů diod, které popisují jejich chování jako součástky. Z průběhů proudů diod zjistíme, že nemají ideální stav a uplatňuje se zde tzv. závěrná zotavovací doba diody, jenž je doba přechodu z propustného stavu do nepropustného stavu, kdy jsou v nepropustném stavu minoritní nosiče náboje vodivé. Na vysokých frekvencích je tato vlastnost omezujícím faktorem. Z průběhu diody D_1 na Obr. 2.2 [19] vidíme, že v oblasti průchodu nuly dochází k závěrné zotavovací době diody t_k v době jejího přechodu.

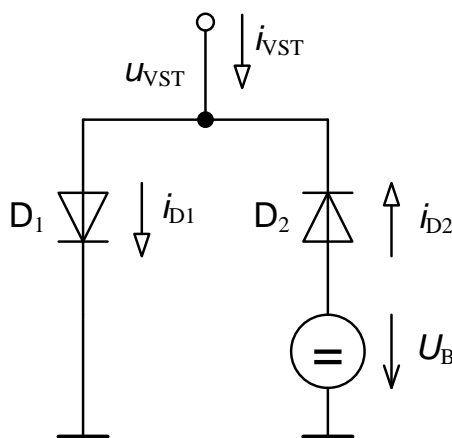


Obr. 2.2: Závěrná zotavovací doba diody t_k při přechodu z propustného stavu do nepropustného stavu u diody D_1 .

Polovodičová součástka dioda je tvořena přechodem PN, který je složen z polovodiče typu P a polovodiče typu N. Polovodič typu P je složen z majoritních nosičů kladného elektrického náboje (díry) a polovodič typu N je složen z majoritních nosičů záporného elektrického náboje (elektrony). Z hlediska fyzikálního nemůžeme dostat ideální diodu, protože oba polovodiče obsahují také minoritní nosiče opačného elektrického náboje. Tyto minoritní nosiče při přechodu právě způsobují závěrnou zotavovací dobu. Tato situace nastává, kdy dioda přechází z propustného stavu do nepropustného stavu, kde pro minoritní nosiče je tento přechod PN stále otevřen i v závěrném směru. Ten je otevřen do té doby, než jsou všechny nahromaděné minoritní nosiče odčerpány a poté závěrný proud i_d klesne na svou minimální hodnotu.

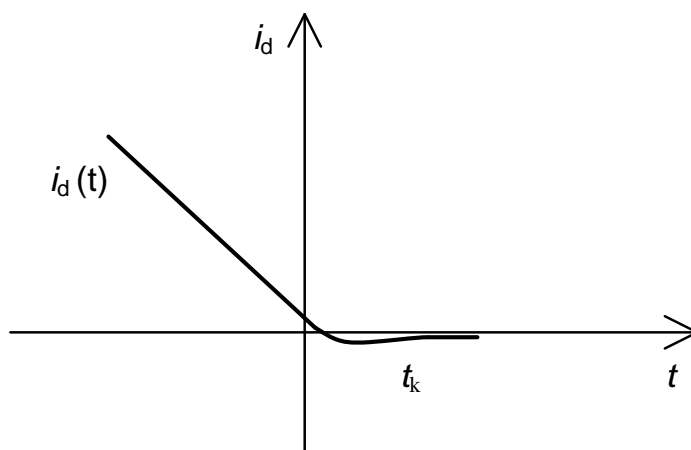
Závěrná zotavovací doba diody se dá rozdělit na dobu t_s (storage time) a dobu t_d (delay time) [19], jak je zobrazeno na Obr. 2.2. V době t_s se nahromaděné minoritní nosiče odvádí z přechodu PN a na diodě zůstává skoro stejné konstantní napětí, které je o něco menší než napětí v propustném stavu. Pokud jsou všechny minoritní nosiče odvedeny, poté nastává doba t_d . Během této doby se nabíjí parazitní kapacita diody a po nabití se na diodě ustálí závěrné napětí. Zkrácení doby t_s lze zvětšením závěrného proudu, což způsobí větší překmit při přepólování.

Modifikací podobvodu [19] z Obr. 2.1 lze zredukovat dobu t_d . Vložením napěťového zdroje s předpětím U_B , jak je vidět na Obr. 2.3, udržujeme diody při průchodu nulou vstupního proudu na hranici propustného stavu a tím při změnách vstupního proudu snížit změny napětí vstupního uzlu. Poté se zkrátí doba t_d , protože nebude takový rozkmit napětí na parazitních kapacitách diod.



Obr. 2.3: Podobvod se dvěma diodami buzené proudem ve variantě s předpětím.

Zavedením napětového zdroje s předpětím se omezí překmit proudu diodou v době stavu přecházejícího z propustného stavu do nepropustného stavu, jak je vidět na charakteristice v oblasti nuly u diody D_1 na Obr. 2.4 [19]. Bohužel i v tomto případě nastává jistá odchylka od ideálních průběhů. Čím větší hodnota předpětí, tím v oblasti změny polarity vstupního proudu poteče diodou větší hodnota proudu. Proto je nutné zvolit předpětí U_B jako kompromis mezi překmitem proudu diodou do opačné polarity a zvýšením proudu diodou v oblasti průchodu nulou vstupního proudu.



Obr. 2.4: Předpětím U_B omezené působení závěrné zotavovací doby diody t_k při přechodu z propustného stavu do nepropustného stavu u diody D_1 .

3 EXISTUJÍCÍ ZAPOJENÍ PŘESNÝCH DVOUCESTNÝCH USMĚRŇOVAČŮ

Důležitými pracovními bloky pro zpracování a úpravu nízko-úrovňových signálů slouží přesné usměrňovače. V jejich měřeném rozsahu jsou využívány jako detektory efektivní hodnoty, polarity signálu nebo amplitudově modulovaných signálů, převodníků stejnosměrného signálu, vzorkovacích obvodů, generátorů špiček atd. [16]. Konvenčním přesným usměrňovačům složených z diod a operačních zesilovačů se projevuje problém vlivu závěrné zotavovací doby diody, která byla podrobně popsána v kapitole 2. Toto zkreslení se projeví během přechodu z propustného stavu do nepropustného stavu a naopak v době nulového přenosu vstupního signálu, kdy se operační zesilovač musí zotavit s konečným malým signálem. Proto jsou tyto přesné usměrňovače omezeny na frekvenčním výkonu [5].

V následujících řádcích bude popsána funkce jednotlivých zapojení přesných usměrňovačů. Jednotlivé obvody jsou simulovány v programu OrCad a byly použity prvky diody 1N4148, operačního zesilovače THS4501 a proudového konvejeoru OPA861. U každého simulovaného obvodu jsou dvě grafická znázornění, která ukazují průběh výstupního napětí při určité frekvenci a amplitudě signálu.

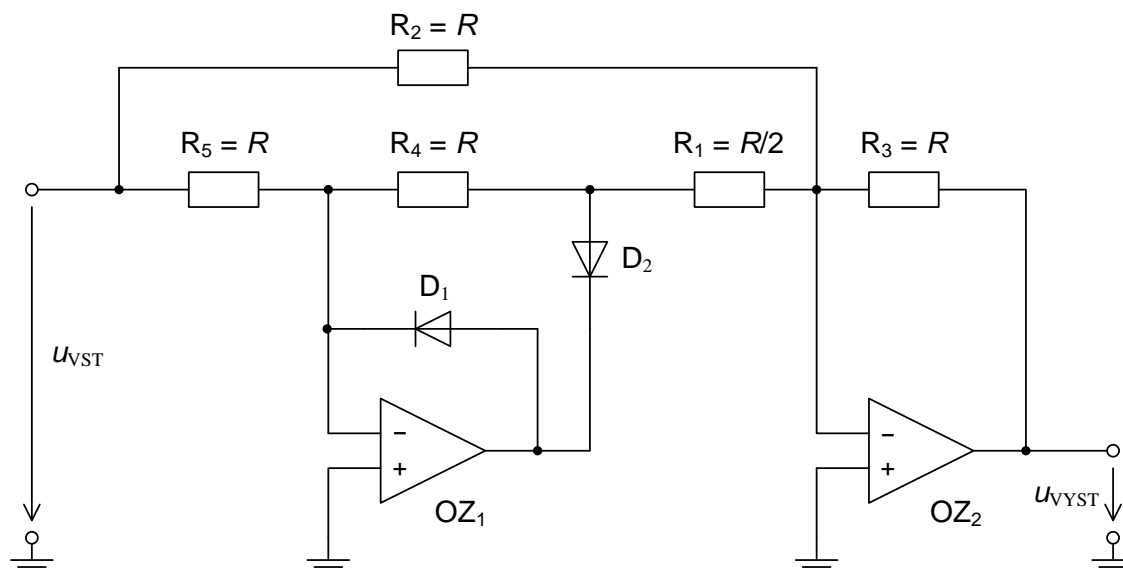
3.1 Univerzální přesný dvoucestný usměrňovač

Tyto univerzální přesné dvoucestné usměrňovače jsou složeny z jednocestného usměrňovače kolem prvního OZ a sumačního zesilovače kolem druhého OZ. V obvodu nejsou hodnoty všech rezistorů stejné, rezistor R_1 má hodnotu odporu $R/2$. V dalších variantách je přidán proudový konvejeor CCII+.

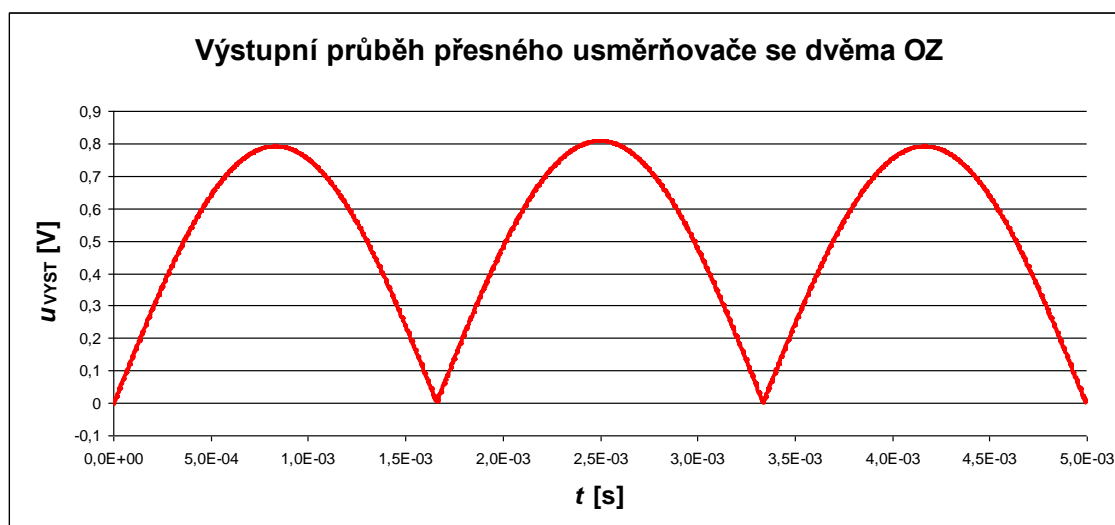
3.1.1 Přesný usměrňovač se dvěma OZ

Příkladem základního přesného usměrňovače je univerzální přesný dvoucestný usměrňovač se dvěma OZ, zobrazený na Obr. 3.1 [5]. Obvody pracují velice dobře na nízkých frekvencích, zatímco na frekvencích vyšších nad 1 kHz se projevuje velké zkreslení průběhů. U tohoto zkreslení dochází, když OZ pracují bez zpětné vazby, protože v době přechodu vstupního signálu jsou diody zavřené. Se zvyšující se frekvencí brání OZ, kvůli své omezené rychlosti přeběhu, rychlému sepnutí diod a tím dochází ke zkreslení výsledných průběhů. Charakteristika simulovaného obvodu s OZ je

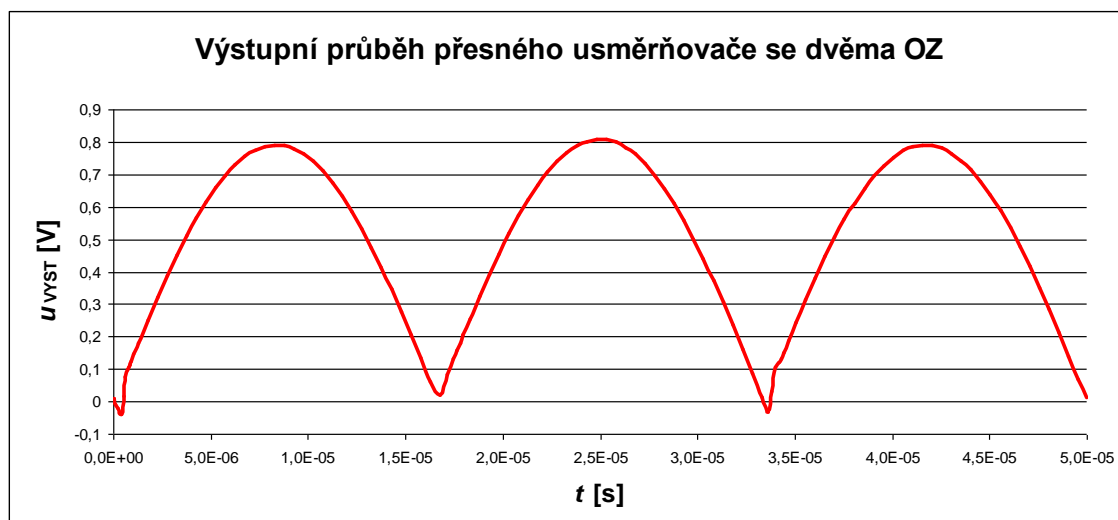
na Obr. 3.2, kde vidíme jeho správnou funkčnost při nízké frekvenci, zatímco při frekvenci 30 kHz pozorujeme na průběhu z Obr. 3.3 zkreslení v oblasti nuly dané vlivem závěrné zotavovací doby diody.



Obr. 3.1: Přesný usměrňovač se dvěma OZ.



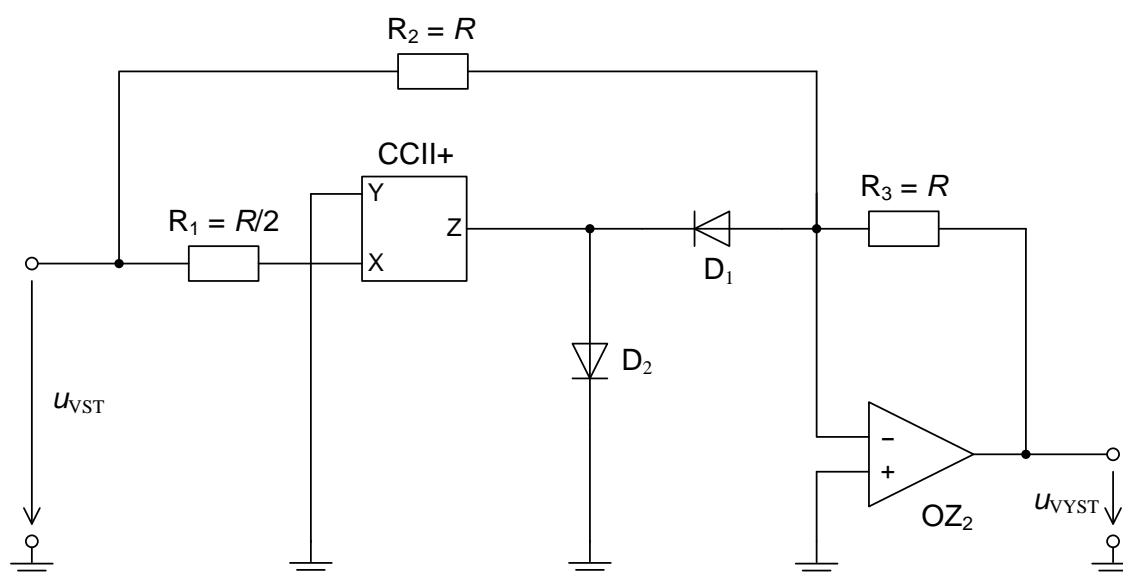
Obr. 3.2: Průběh výstupního napětí přesného usměrňovače se dvěma OZ při frekvenci 300 Hz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.



Obr. 3.3: Průběh výstupního napětí přesného usměrňovače se dvěma OZ při frekvenci 30 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

3.1.2 Přesný usměrňovač s OZ a CCII+

Problémy zkreslení lze částečně potlačit použitím proudových konvektorů, kde vysoká výstupní impedance CC překoná spínací odpor diody a poté obvod pracuje při frekvencích až do stovek kHz. Úpravou obvodu z Obr. 3.1 dostaneme obvod na Obr. 3.4 tvořený nadále sumačním zesilovačem kolem OZ_2 a pozměněnou částí jednocestného usměrňovače s větší šířkou pásma použitím proudového konvektoru $CCII+$ [5].



Obr. 3.4: Přesný usměrňovač s OZ a $CCII+$.

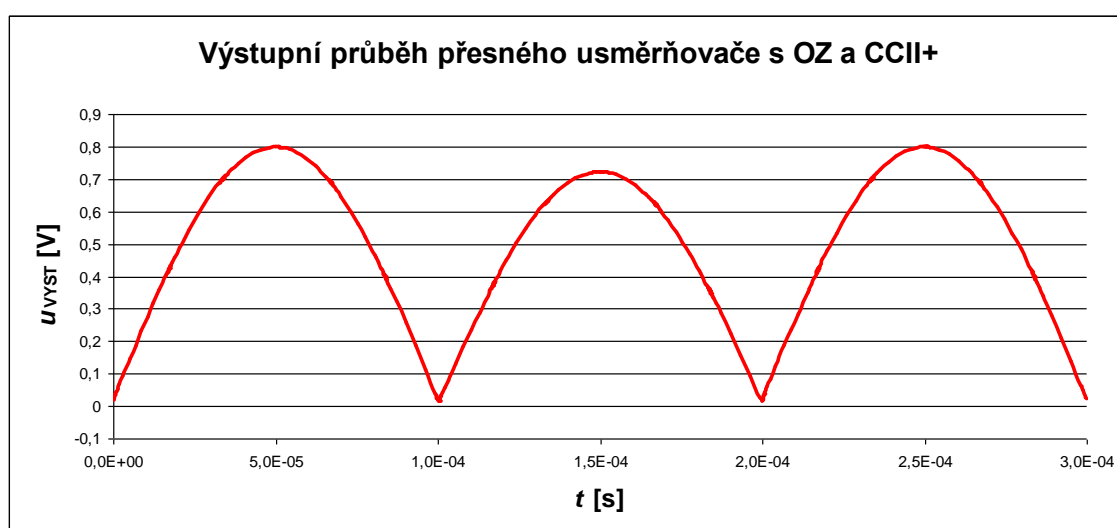
Potom přenosová funkce obvodu z Obr. 3.4 je dána

$$u_{VYST} = |u_{VST}|, \quad (3.1)$$

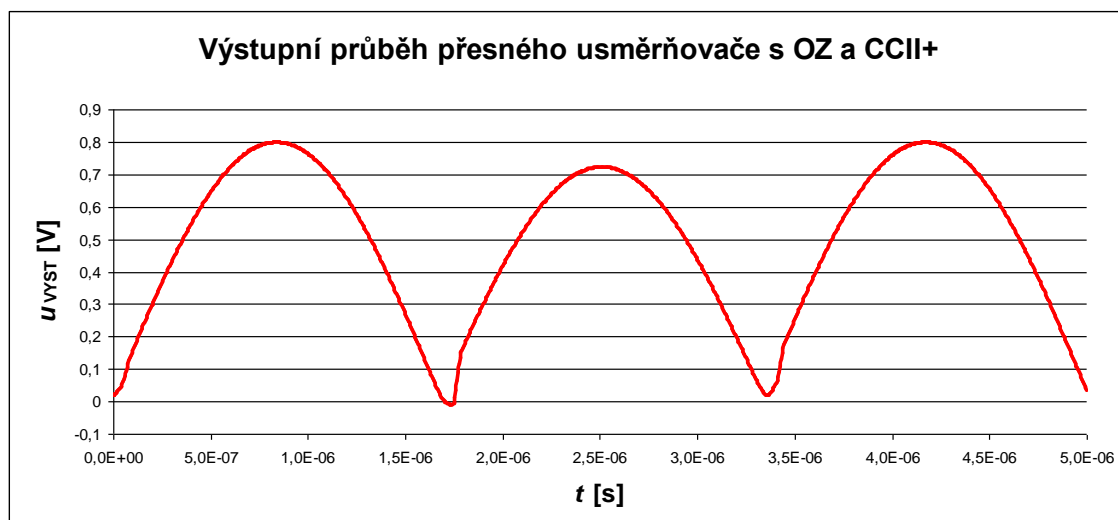
za předpokladu kdy

$$R_1 + r_x = \frac{R}{2}. \quad (3.2)$$

Jenže rovnice (3.2) [5] obsahuje parazitující složku odporu r_x invertovaného vstupu proudového konvejeoru CCII+, která ovlivní přenosovou funkci (3.1) [5] a obvod je poté nepřesný i když měří ve větší šířce frekvenčního pásma, zatímco OZ je přesnější, ale jeho šířka pásma je malá oproti CC. Vysoká výstupní impedance výstupní svorky proudového konvejeoru CCII+ překoná odpor sepnutí diody, poté jednocestně usměrněný proud protéká při kladné půlvlně vstupního signálu u_{VST} skrz diodu D_1 , který je sečten v sumačním zesilovači OZ_2 se vstupním signálem stanoveným rezistory v obvodě, kdy hodnoty odporů jsou $R_1 = R/2$ a $R_2 = R_3 = R$. Charakteristika simulovaného obvodu s OZ a CCII+ je na Obr. 3.5, kde při frekvenci 5 kHz vidíme jeho správnou funkčnost v oblasti nuly, ale zkreslení se projeví parazitním odporem r_x v přenosové funkci. Při frekvenci 300 kHz pozorujeme na průběhu z Obr. 3.6 zkreslení v oblasti nuly dané vlivem závěrné zotavovací doby diody a také parazitním odporem r_x v přenosové funkci.



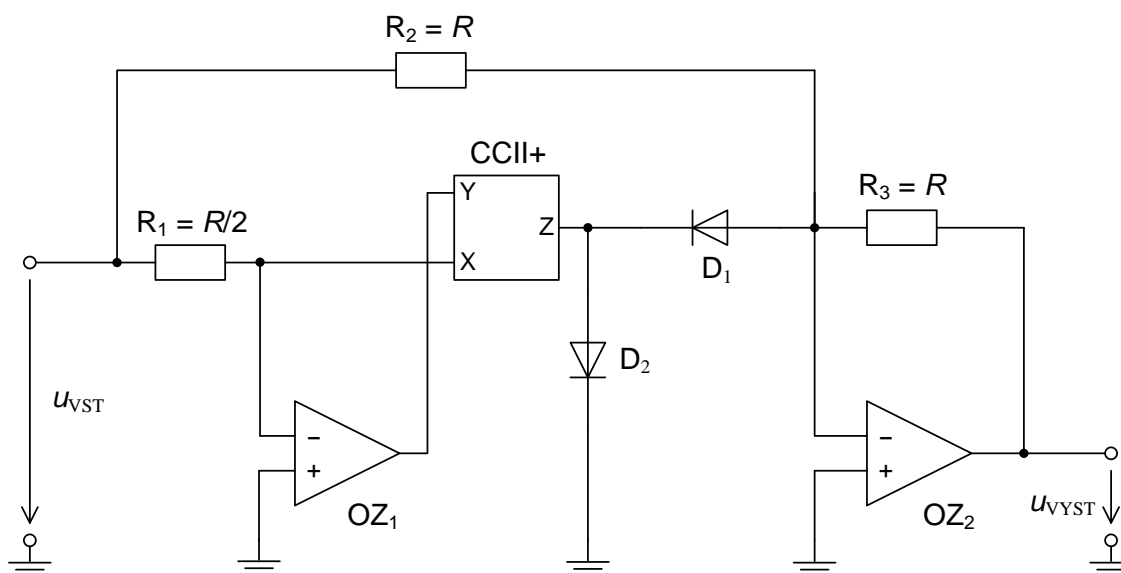
Obr. 3.5: Průběh výstupního napětí přesného usměrňovače s OZ a CCII+ při frekvenci 5 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.



Obr. 3.6: Průběh výstupního napětí přesného usměrňovače s OZ a CCII+ při frekvenci 300 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

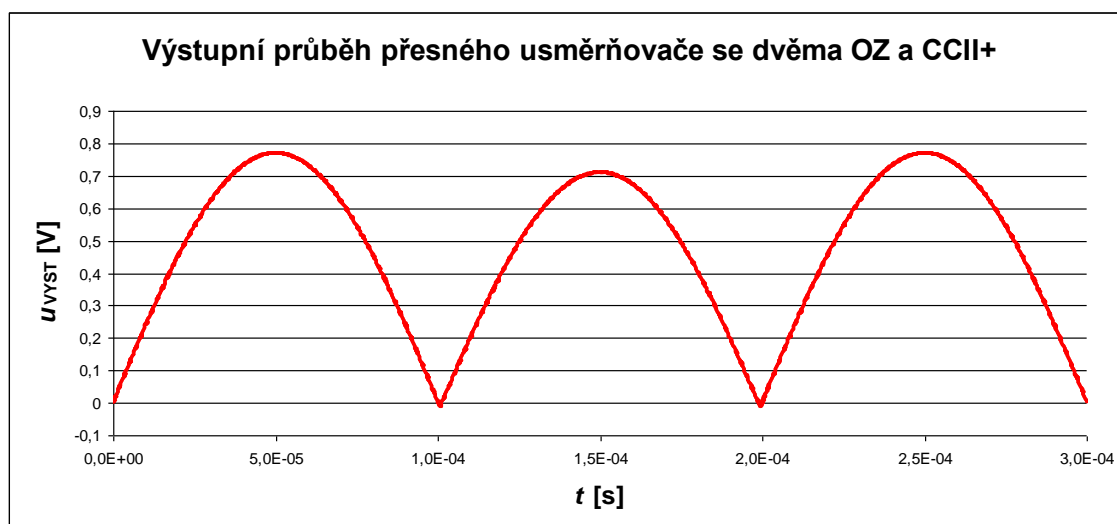
3.1.3 Přesný usměrňovač se dvěma OZ a CCII+

Změnou obvodu Obr. 3.4 dostaneme zapojení, které je složené ze sumačního zesilovače kolem OZ_2 a část obvodu jednocestného usměrňovače je upravena do podoby s operačním konvejozem, tzn. kombinací operačního zesilovače OZ_1 a proudového konvejoz CCII+ [5], jak je znázorněno na Obr. 3.7.

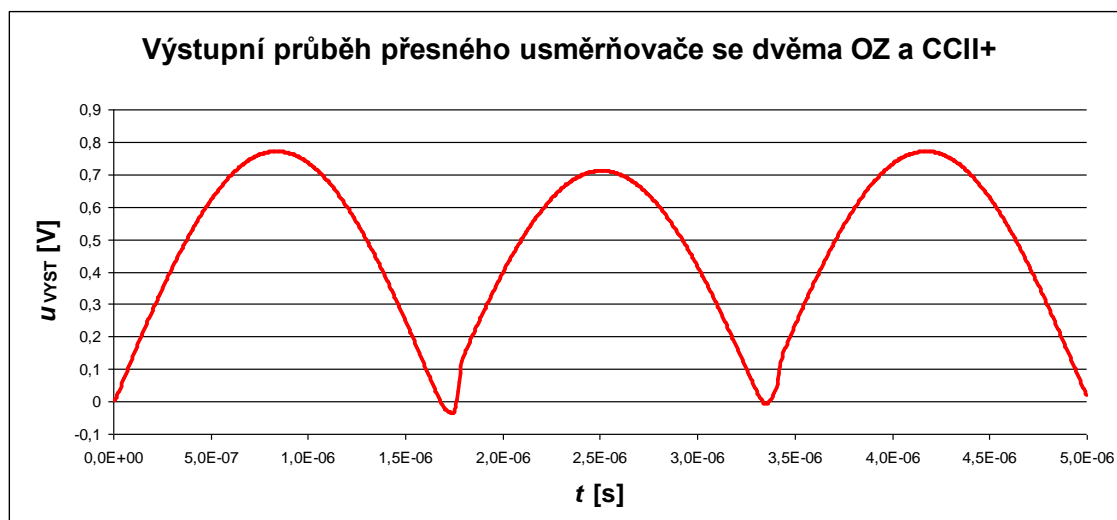


Obr. 3.7: Přesný usměrňovač se dvěma OZ a CCII+.

Velký zisk operačního zesilovače OZ_1 vyruší parazitní rezistanci r_X a tím vylepší přesnost celého obvodu. Dále obvod měří ve větší šířce pásma díky vysoké výstupní impedanci výstupní svorky proudového konveju CCII+, která překoná odpor sepnutí diody. Jednocestně usměrněný proud protéká při kladné půlvlně vstupního signálu u_{VST} skrz diodu D_1 , který je sečten v sumačním zesilovači OZ_2 se vstupním signálem stanoveným rezistorem v obvodě, kdy hodnoty odporů jsou $R_1 = R/2$ a $R_2 = R_3 = R$. Charakteristika simulovaného obvodu s OZ a CCII+ je na Obr. 3.8, kde při frekvenci 5 kHz vidíme jeho správnou funkčnost v oblasti nuly, ale zkreslení se projeví parazitním odporem r_X v přenosové funkci. Při frekvenci 300 kHz pozorujeme na průběhu z Obr. 3.9 zkreslení v oblasti nuly dané vlivem závěrné zotavovací doby diody a také parazitním odporem r_X v přenosové funkci. Zkreslení způsobené malými vstupními signály v obvodech s proudovými konvejory lze zmenšit vykompenzováním výstupu konveju napěťovým přednastavením diod nebo proudovým řízením diod. Tato problematika byla již probrána v kapitole 2.



Obr. 3.8: Průběh výstupního napětí přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+ při frekvenci 5 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.



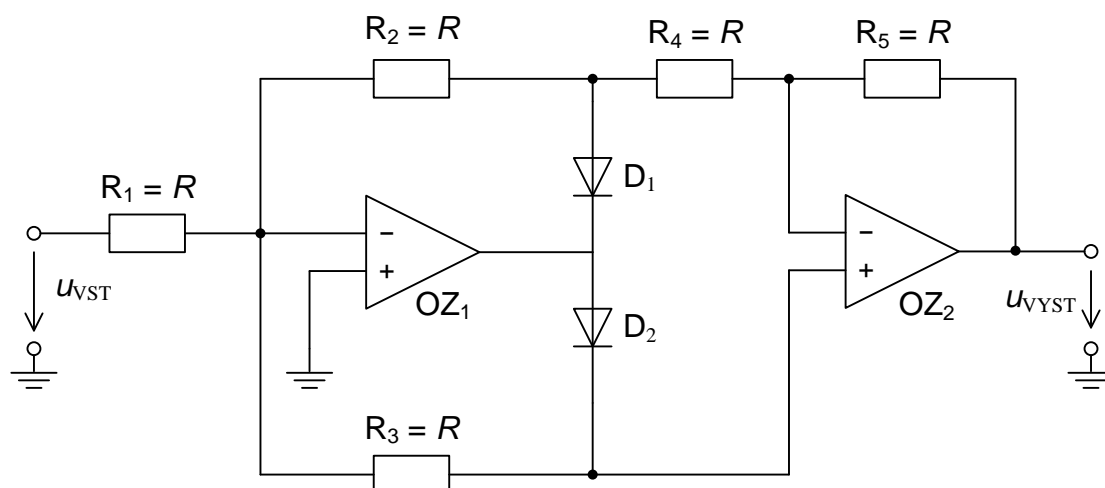
Obr. 3.9: Průběh výstupního napětí přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+ při frekvenci 300 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

3.2 Upravený univerzální přesný dvoucestný usměrňovač

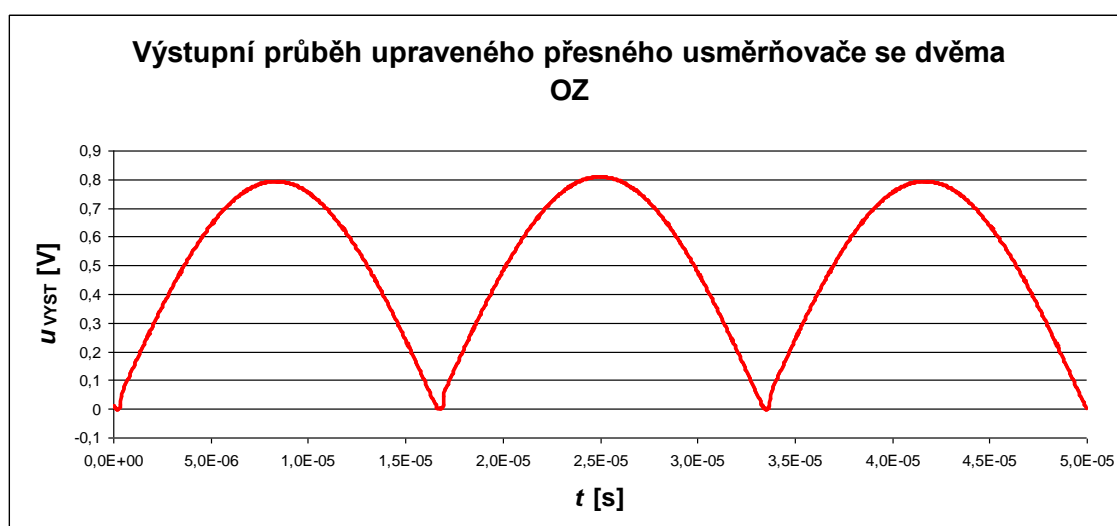
Tyto upravené univerzální přesné dvoucestné usměrňovače jsou taktéž složeny z jednocestného usměrňovače kolem prvního OZ a sumačního zesilovače kolem druhého OZ, jak bylo popsáno v podkapitole 3.1. V těchto upravených přesných usměrňovačích je ale výhodou, že všechny rezistory v daném obvodu mají stejnou hodnotu odporu R . V dalších variantách je přidán proudový konvektor CCII+.

3.2.1 Upravená varianta přesného usměrňovače se dvěma OZ

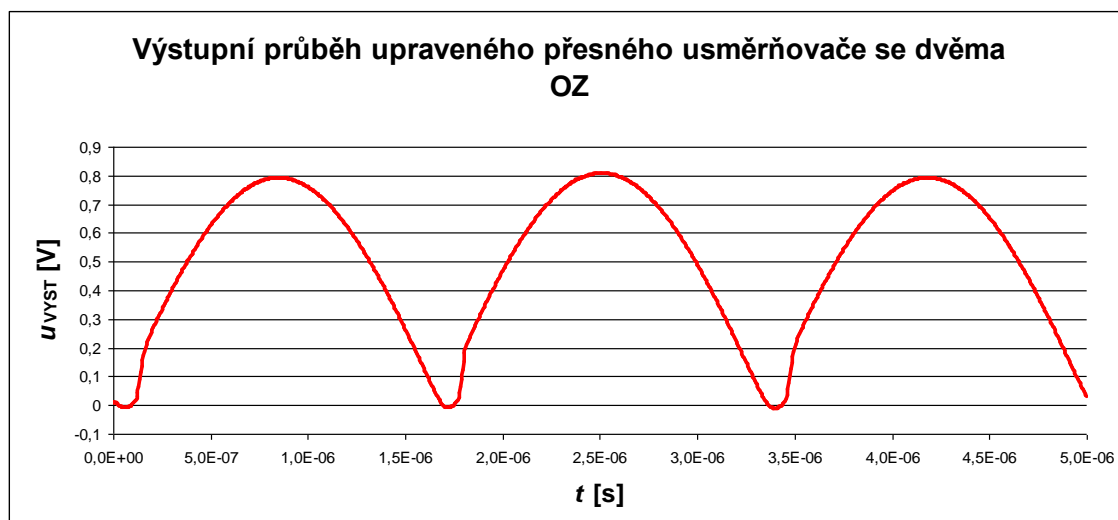
Tato varianta obvodu přesného usměrňovače je upravena z Obr. 3.1 a je specifická tím, že má vyšší vstupní impedanci. Tento upravený obvod je znázorněn na Obr. 3.10 [5]. Charakteristika simulovaného upraveného obvodu se dvěma OZ je na Obr. 3.11, kde vidíme maximální hranici jeho správné funkčnosti při frekvenci 30 kHz, která je mnohem lepší než výstupní průběh Obr. 3.3 v obvodu Obr. 3.1 při stejné frekvenci. Na výstupním průběhu při frekvenci 300 kHz z Obr. 3.12 pozorujeme zkreslení v oblasti nuly dané vlivem závěrné zotavovací doby diody.



Obr. 3.10: Upravená varianta přesného usměrňovače se dvěma OZ.



Obr. 3.11: Průběh výstupního napětí simulovaného upraveného přesného usměrňovače se dvěma OZ při frekvenci 30 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

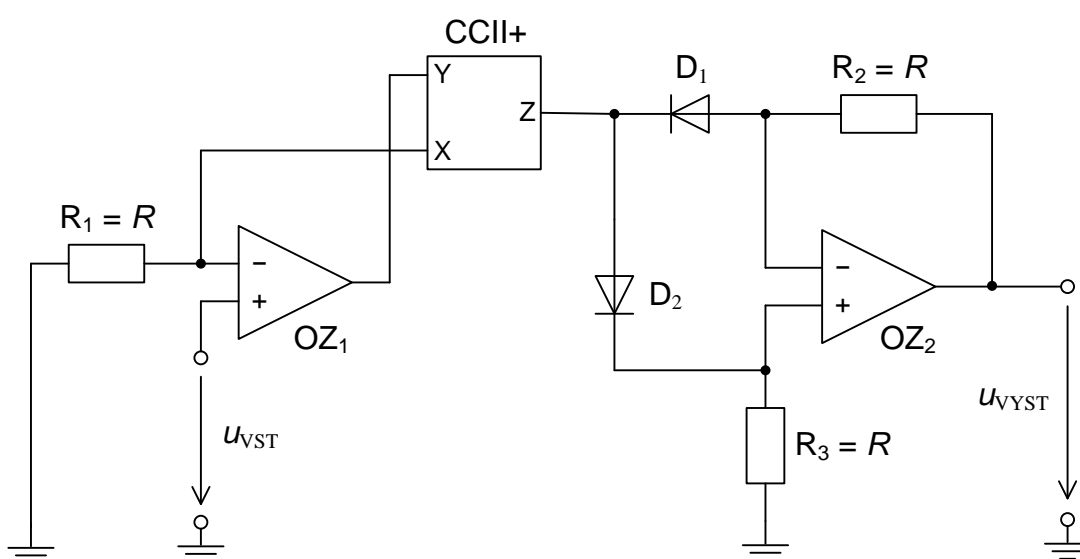


Obr. 3.12: Průběh výstupního napětí simulovaného upraveného přesného usměrňovače se dvěma OZ při frekvenci 300 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

Z těchto nasimulovaných charakteristik lze usoudit, že upravený obvod z Obr. 3.10 je mnohonásobně lepší než obvod z Obr. 3.1, dokáže totiž pracovat ve větší šířce frekvenčního pásma, i když oba používají pouze OZ.

3.2.2 Upravená varianta přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+

Úpravou obvodu se dvěma OZ z Obr. 3.10 a přidáním proudového konveje CCII+ do kombinace s operačním zesilovačem OZ_1 dostaneme obvod přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+ [5], který je znázorněn na Obr. 3.13.



Obr. 3.13: Upravená varianta přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+.

Opět zde platí, že vysoká výstupní impedanci výstupní svorky proudového konveju CCII+ překoná odpor sepnutí diod D_1 a D_2 a operační zesilovač OZ_1 zlepší přesnost celého obvodu. Výsledkem obvod dokáže měřit ve velké šířce frekvenčního pásma. Vzhledem k velkému zisku OZ naprázdno je proud tekoucí obvodem dán rovnicí [5]

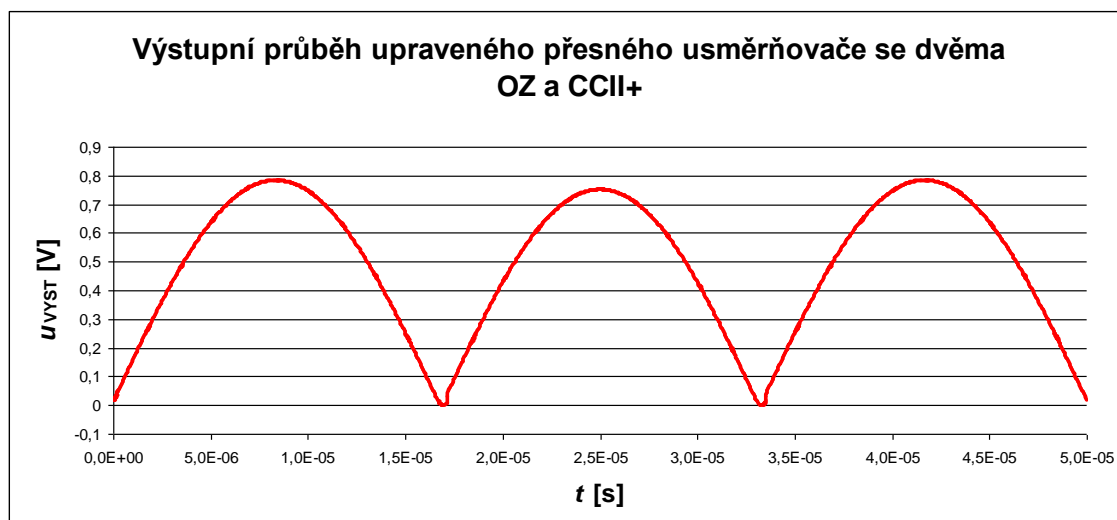
$$i_{obv} = \frac{u_{VST}}{R}, \quad (3.3)$$

kde při kladné půlvlně vstupního signálu se dioda D_1 rozezne a dioda D_2 sepne a proud i_{obv} protéká diodou D_2 do rezistoru R_3 . Tím se na rezistoru R_3 vytváří napětí $u_{VYST} = u_{VST}$ a proto OZ_2 funguje jako sledovač napětí. Pro negativní půlvlnu vstupního signálu se dioda D_2 rozezne a dioda D_1 se sepne a začne jí protékat proud i_{obv} , který zapříčiní pokles napětí na rezistoru R_2 . Neinvertující vstup OZ_2 je sveden na zem přes rezistor R_3 a vytváří napětí $u_{VYST} = u_{VST}$. Výsledkem po dvoucestném usměrnění platí rovnice [5]

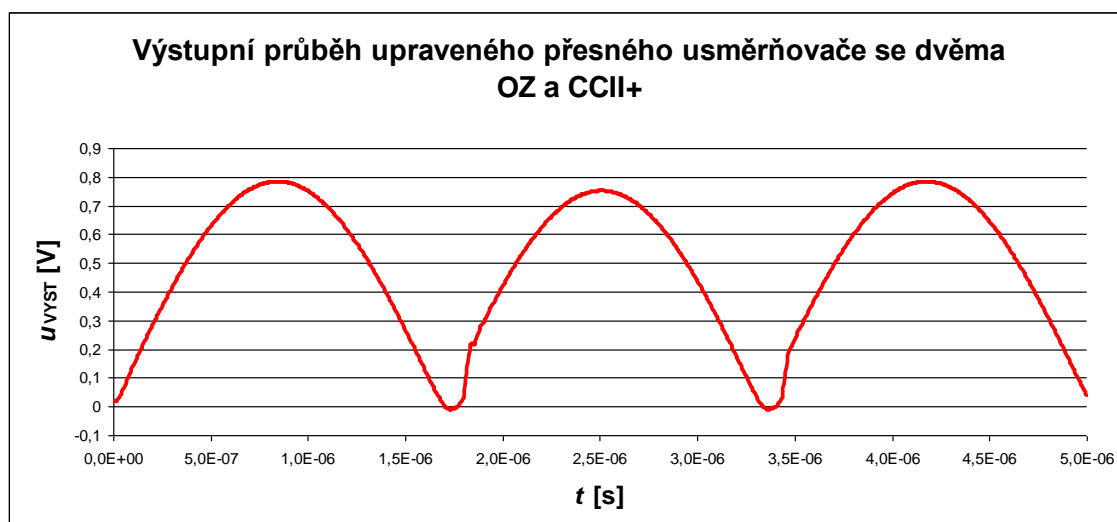
$$u_{VYST} = |u_{VST}|. \quad (3.4)$$

Charakteristika simulovaného upraveného obvodu se dvěma OZ a CCII+ je na Obr. 3.14, kde vidíme maximální hranici jeho správné funkčnosti při frekvenci 30 kHz. Na výstupním průběhu při frekvenci 300 kHz z Obr. 3.15 pozorujeme zkreslení v oblasti nuly dané vlivem závěrné zotavovací doby diody.

Jak můžeme porovnat nasimulované charakteristiky výstupních napětí přesného usměrňovače se dvěma OZ z Obr. 3.10 a přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+ z Obr. 3.13, tak si jsou velice podobné i když podle literatury [5] má mít obvod z Obr. 3.13 lepší vlastnosti než na Obr. 3.10. To může být dáno použitím jiných prvků v obvodu než bylo při simulacích použito v [5].



Obr. 3.14: Průběh výstupního napětí simulovaného upraveného přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+ při frekvenci 30 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.



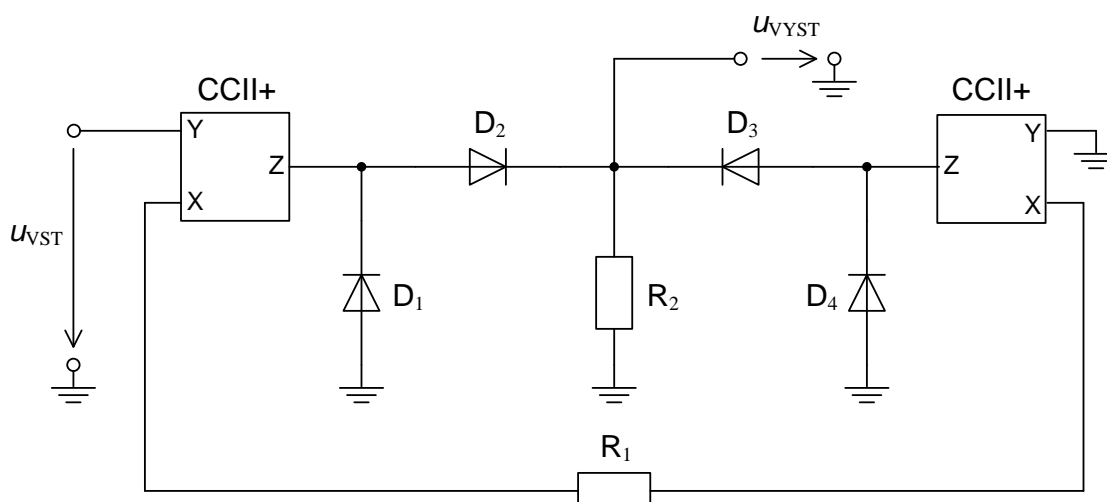
Obr. 3.15: Průběh výstupního napětí simulovaného upraveného přesného usměrňovače se dvěma OZ a CCII+ při frekvenci 300 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

3.3 Vysokofrekvenční přesný dvoucestný usměrňovač

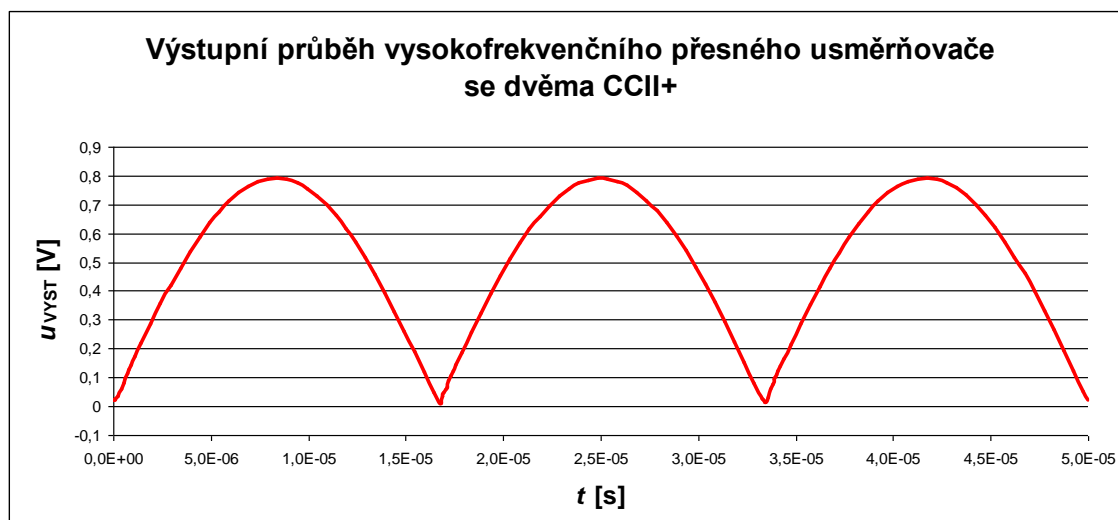
Varianta přesného usměrňovače se dvěma konvejory představuje Obr. 3.16 jako vysokofrekvenční přesný dvoucestný usměrňovač se dvěma konvejory CCII+ ve formě diferenciálního převodníku U-I, o kterém je více popsáno v [16]. V tomto obvodu dokáže proudový konvektor CCII+ pracovat až do 100 MHz, ale je omezen malými signály, kdy při velké rychlosti přeběhu jsou uzavřeny diody a tento diferenciální převodník přechází na vysoce ziskový napětový diferenciální zesilovač.

Charakteristika simulovaného obvodu při 30 kHz s CCII+ je vidět na Obr. 3.17, kde v oblasti nuly se neprojevuje vliv závěrné zotavovací doby diod.

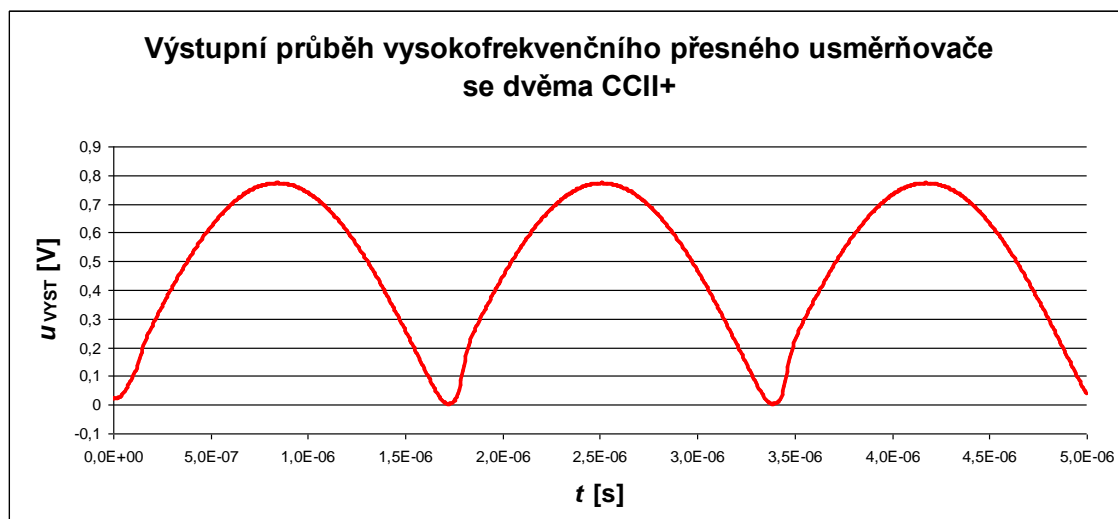
Vlastnosti vysokofrekvenčního přesného dvoucestného usměrňovače z Obr. 3.16 vylepšíme použitím buď napěťového řízení, kde mezi diody D_1 , D_4 a zemí umístíme napěťový zdroj s předpětím U_B , jak již bylo zmíněno v kapitole 2, nebo proudovým řízením, kde mezi diody D_1 , D_4 a zemí umístíme proudový zdroj s proudem I_B a k němu paralelně rezistor o hodnotě $R = 85\text{--}120\ \Omega$ [6]. Proudové řízení diody je výhodné v tom, že tento vysokofrekvenční usměrňovač je méně teplotně citlivý než když je dioda napěťově řízena, která poté vykazuje špatnou teplotní charakteristiku. Sice předpětím U_B nastavíme diody blízko jejich otevřenému stavu, ale jakékoli zkreslení nastaveného předpětí U_B se projeví na offsetovém napětí výstupního uzlu [6].



Obr. 3.16: Vysokofrekvenční přesný dvoucestný usměrňovač se dvěma konvejory CCII+.



Obr. 3.17: Průběh výstupního napětí simulovaného vysokofrekvenčního přesného usměrňovače se dvěma konvejory CCII+ při frekvenci 30 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.



Obr. 3.18: Průběh výstupního napětí simulovaného vysokofrekvenčního přesného usměrňovače se dvěma konvejory CCII+ při frekvenci 300 kHz a amplitudě vstupního signálu 0,8 V.

4 SIMULACE NAVRHOVANÝCH OBVODŮ

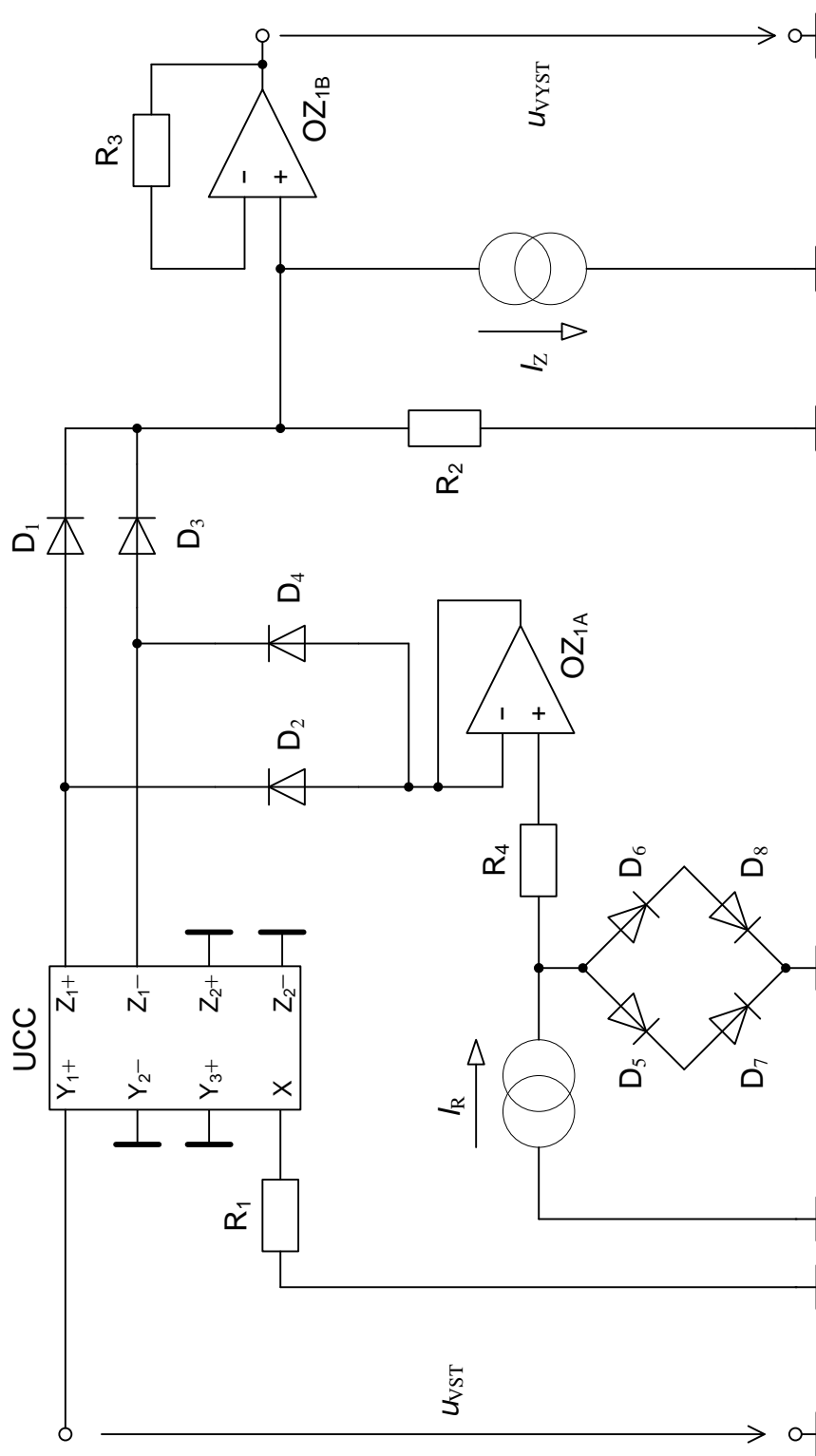
Praktická část této diplomové práce se skládá z nasimulovaných výstupních charakteristik, která jsou popsána v této kapitole a v další kapitole jsou popsány reálné výstupy původních a navrhovaných přípravků a naměřeny převodové a výstupní charakteristiky.

Návrhy dvou nově navrhovaných obvodových řešení vychází ze známých zapojení přesných dvoucestných usměrňovačů. U nově navrhovaných obvodů je schéma, popis funkce, nasimulované charakteristiky a srovnání těchto výstupních průběhů s původními známými obvody.

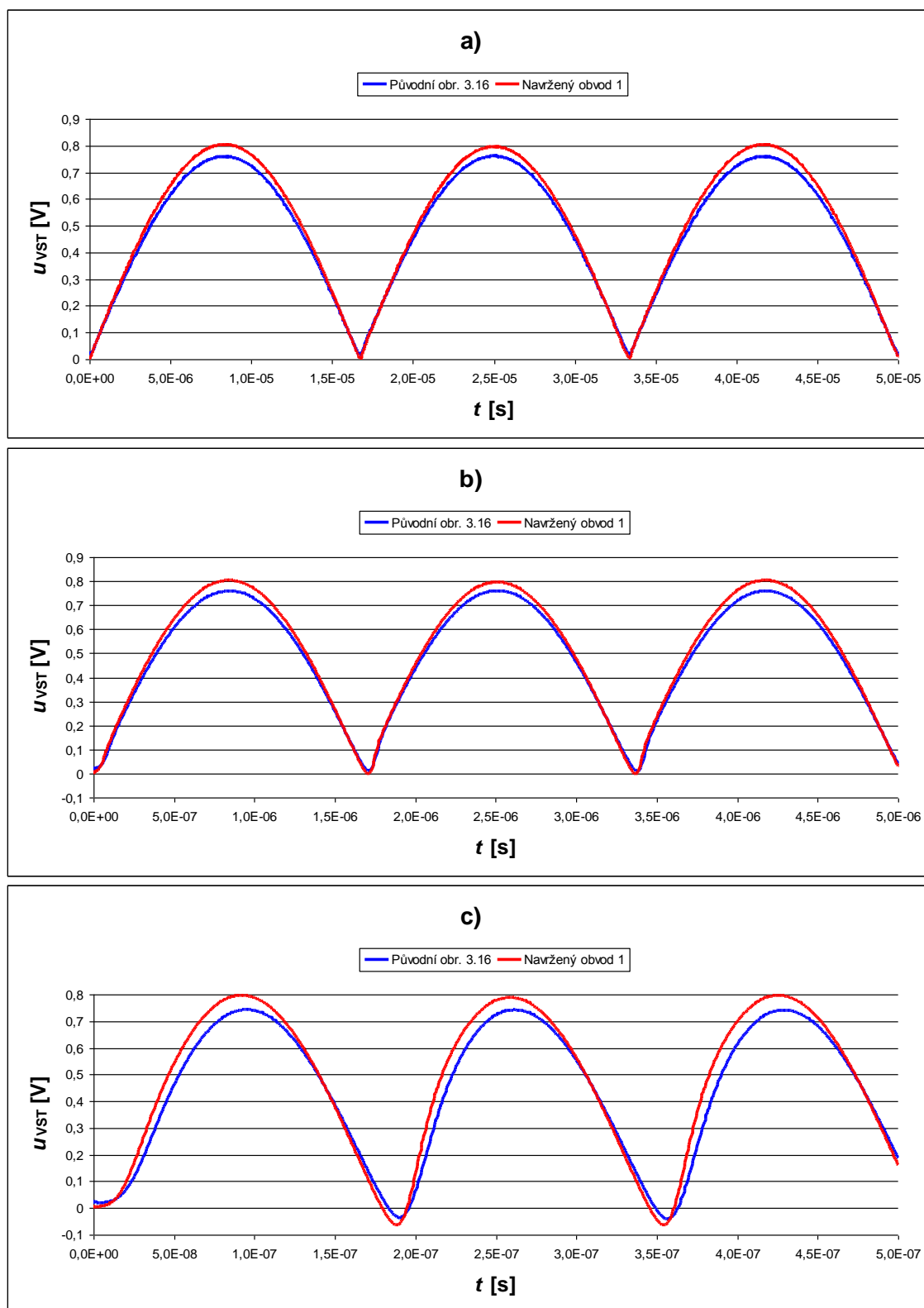
4.1 První navrhovaný obvod

Navrhovaný obvod na Obr. 4.1 je úpravou obvodu z Obr. 3.16, kde místo dvou CCII+ je použit UCC, který využívá výstupní svorku Z_{1+} pro kladnou půlvlnu signálu a výstupní svorku Z_{1-} pro zápornou půlvlnu signálu. Než je tento signál přiveden na vstupní svorku Y_{1+} je zpracován OZ pro lepší přesnost. V obvodě je také použito proudového řízení, které částečně utlumí vliv závěrné zotavovací doby diod a obvod je méně teplotně citlivý. Takto vzniklý řídicí proud je také odsáván jako zbytkový proud druhým proudovým zdrojem, aby neovlivnil výstupní průběhy.

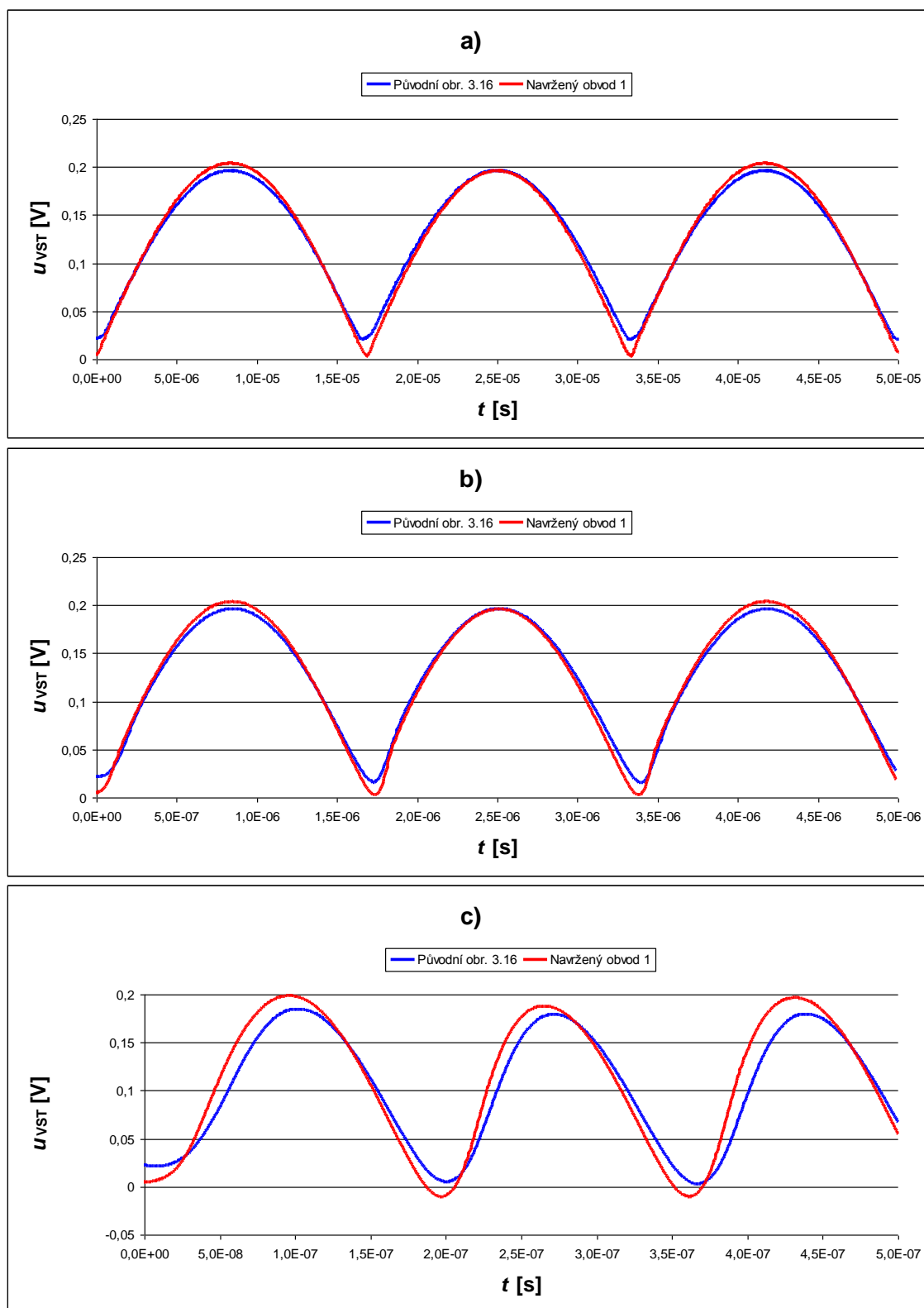
Vstupní napětí u_{VST} je přivedeno do vstupní svorky Y_{1+} UCC. Poté kladná půlvlna u_{VST} prochází výstupní svorkou Z_{1+} přes diodu D_1 na výstup. Kladná půlvlna je z výstupu Z_{1-} přes diodu D_4 svedena na zem. Záporná půlvlna u_{VST} je z výstupní svorky Z_{1+} přes diodu D_2 svedena na zem. Záporná půlvlna prochází z výstupu Z_{1-} přes diodu D_3 na výstup sledovače napětí OZ_{1B} . Hodnoty rezistorů v obvodě jsou $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ a nepoužité svorky UCC jsou uzemněny.



Obr. 4.1: Schéma prvního navrhovaného obvodu přesného dvoucestného usměřovače.



Obr. 4.2: Porovnání simulovaných výstupních průběhů původního obvodu obr. 3.16 s proudovým řízením diod a navrhovaného obvodu 1 s proudovým řízením diod při amplitudě vstupního signálu 0,8 V a při frekvenci a) 30 kHz, b) 300 kHz, c) 3 MHz.

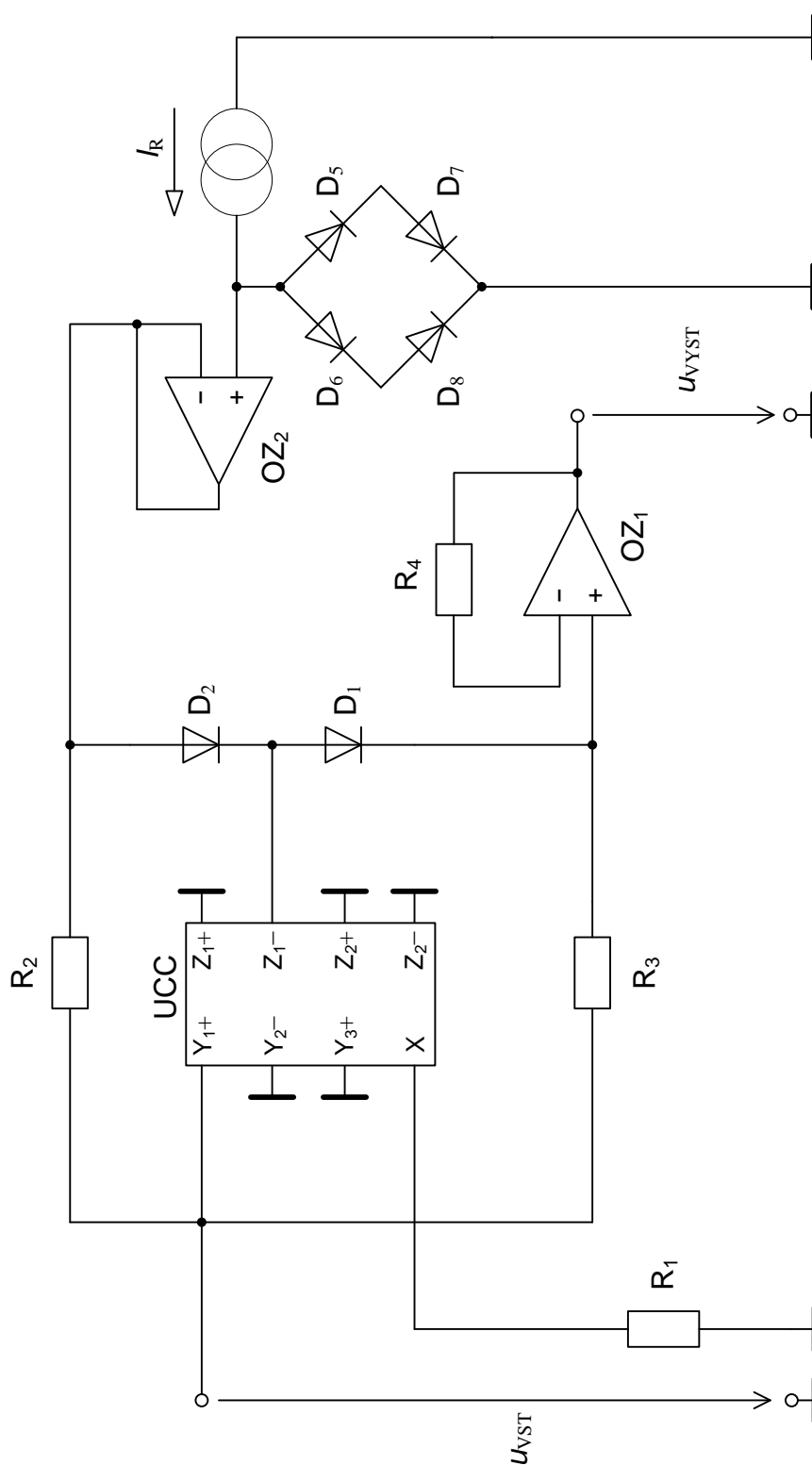


Obr. 4.3: Porovnání simulovaných výstupních průběhů původního obvodu obr. 3.16 s proudovým řízením diod a navrhovaného obvodu 1 s proudovým řízením diod při amplitudě vstupního signálu 0,2 V a při frekvenci a) 30 kHz, b) 300 kHz, c) 3 MHz.

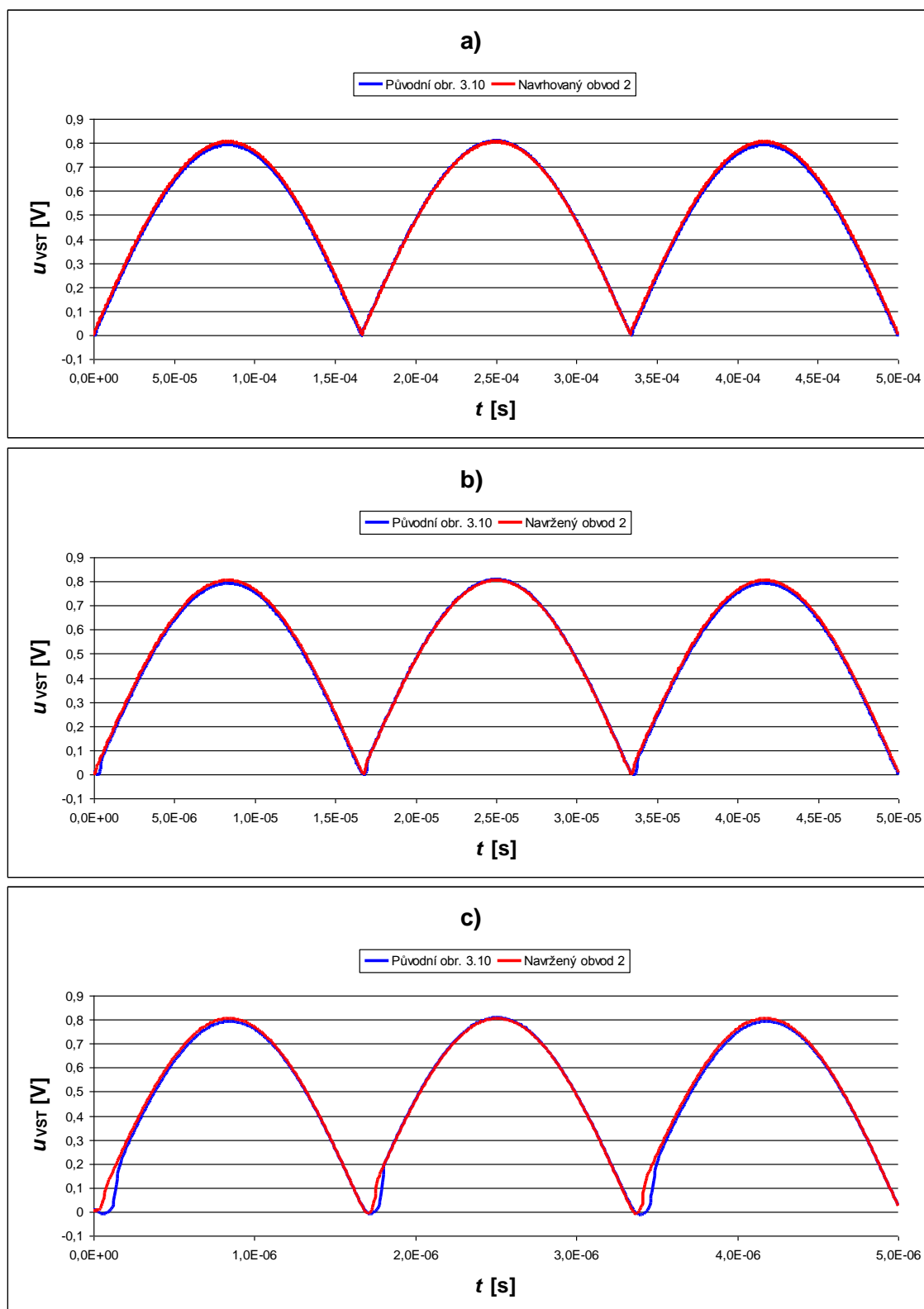
4.2 Druhý navrhovaný obvod

Navrhovaný obvod na Obr. 4.4 je úpravou obvodu z Obr. 3.10, kde je vynechán rezistor R_4 a rezistor R_5 je nahrazen rezistorem R_4 , dále místo prvního OZ_1 je použit UCC. Zde je také použito proudového řízení proudovým zdrojem. Obvod má stabilní amplitudu signálu i při nízkých hodnotách vstupního napětí.

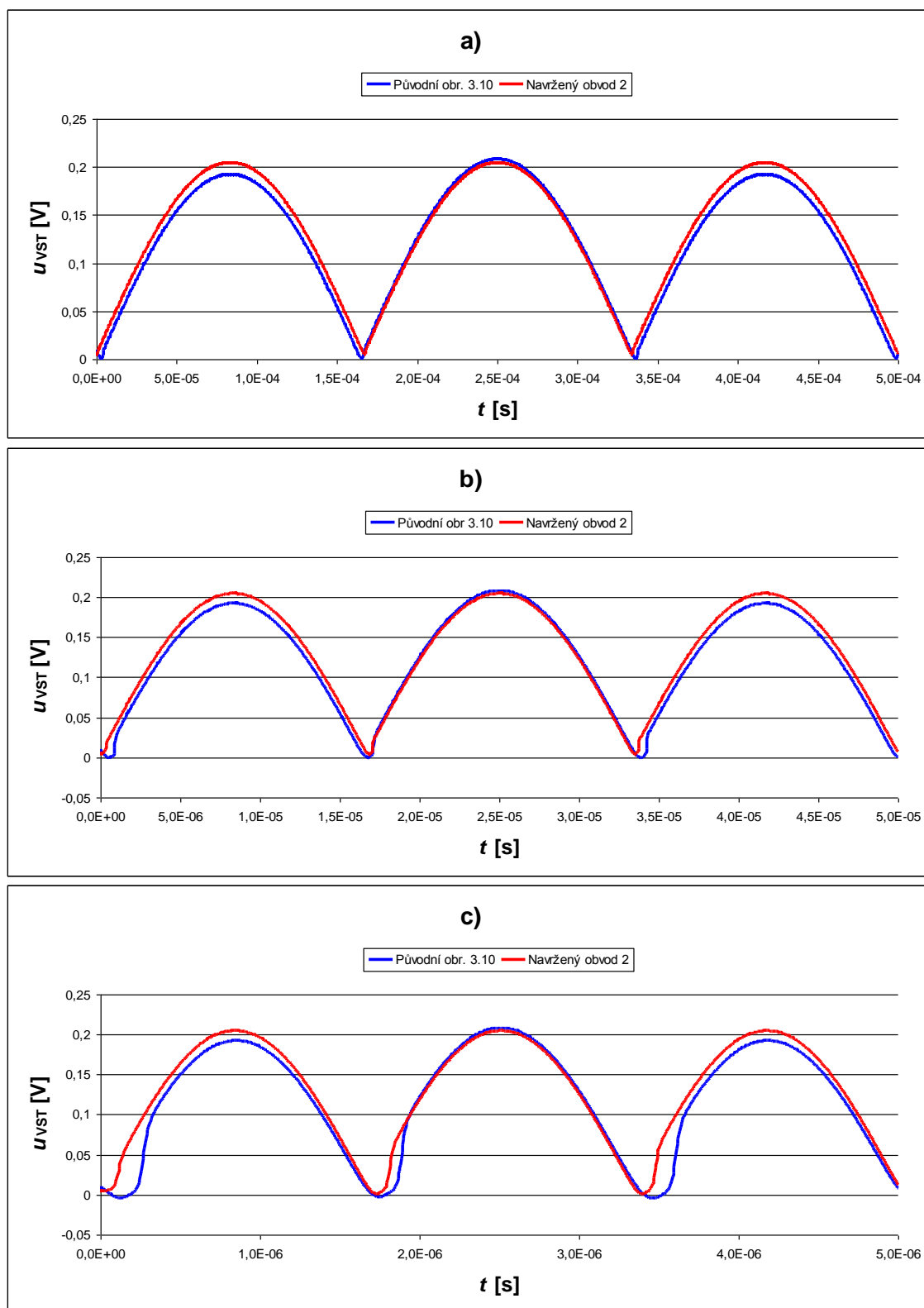
Vstupní napětí u_{VST} je přivedeno do vstupní svorky Y_{1+} UCC. Poté negativní výstupní svorkou Z_{1-} je signál upraven tak, až se dostane na invertující vstup sledovače napětí OZ_1 a podle nastaveného rezistoru $R_1 = 500 \Omega$ a hodnoty rezistorů $R_2 = R_3 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ vznikne na výstupu OZ_1 dvoucestně usměrněný signál.



Obr. 4.4: Schéma druhého navrhovaného obvodu přesného dvoucestného usměrňovače.



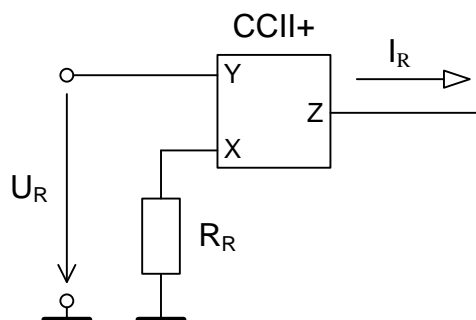
Obr. 4.5: Porovnání simulovaných výstupních průběhů původního obvodu obr. 3.10 a navrhovaného obvodu 2 při amplitudě vstupního signálu 0,8 V a při frekvenci a) 3 kHz, b) 30 kHz, c) 300 kHz.



Obr. 4.6: Porovnání simulovaných výstupních průběhů původního obvodu obr. 3.10 a navrhovaného obvodu 2 při amplitudě vstupního signálu 0,2 V a při frekvenci a) 3 kHz, b) 30 kHz, c) 300 kHz.

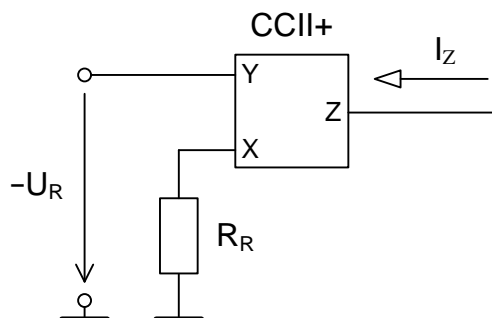
4.3 Proudový zdroj

Pro navrhovaná řešení bylo použito konkrétní realizace řídicího proudového zdroje pro řízení diod zobrazený na Obr. 4.7. Řídicí proud I_R vznikne vhodným nastavením velikostí řídicího napětí U_R a rezistorem R_R . Tento řídicí proud I_R je poté kopírován na výstup proudového konveju. V mých navrhovaných obvodech bylo použito proudového řízení o velikosti $I_R = 20 \mu\text{A}$, což vznikne poměrem řídicího napětí $U_R = 0,6 \text{ V}$ a rezistoru $R_R = 30 \text{ k}\Omega$.



Obr. 4.7: Realizace proudového zdroje pro řízení diod.

Pokud použijeme řídicí napětí U_R záporné polarity a rezistoru R_R o stejné hodnotě, bude poté tento proud pro řízení diod odsáván, jak je vidět na Obr. 4.8, aby neovlivnil průběh výstupního napětí.



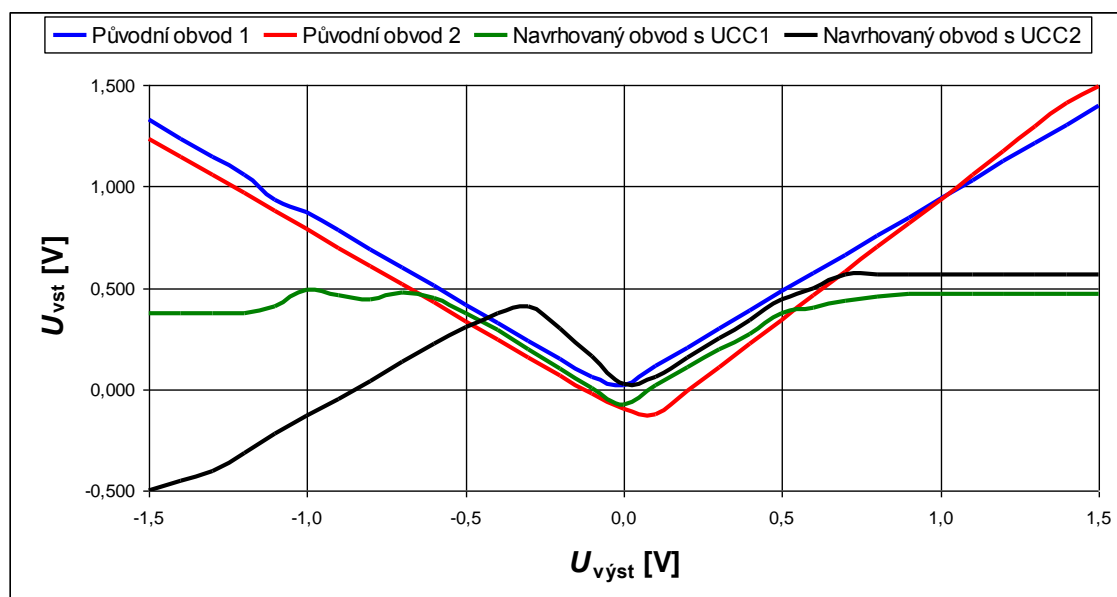
Obr. 4.8: Realizace proudového zdroje pro odsávání proudu pro řízení diod.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VERIFIKACE VÝSLEDKŮ REALIZOVANÝCH OBVODŮ

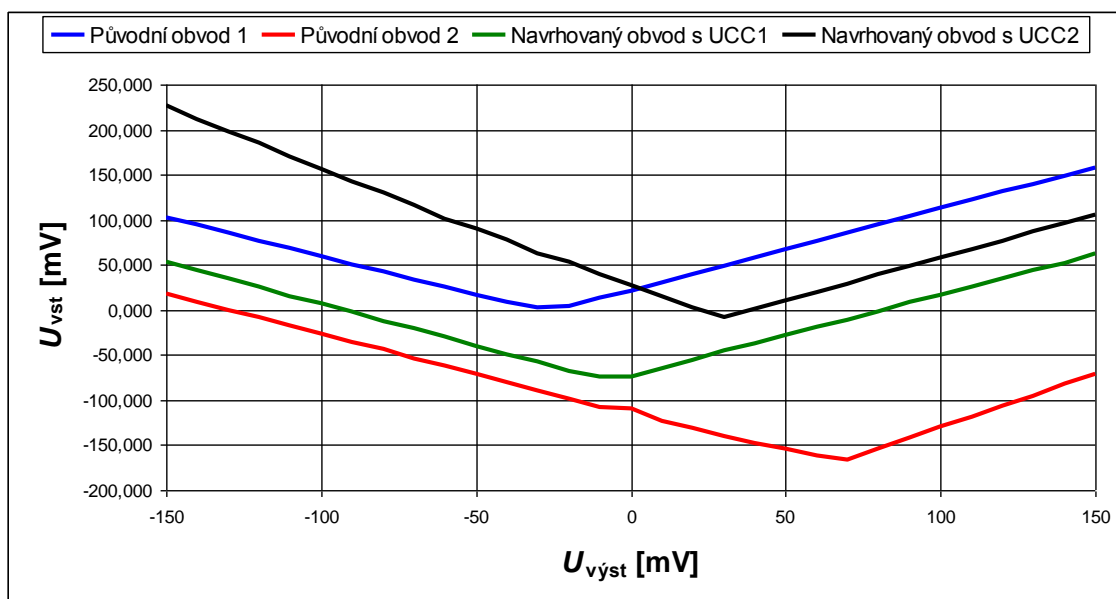
Další praktická část popisuje v této kapitole chování realizovaných původních a navrhovaných obvodových řešení. U těchto přípravků jsou naměřeny převodové charakteristiky, pro navrhované obvody také s proudovým řízením. Dále jsou na osciloskopu u všech přípravků naměřeny charakteristiky výstupního dvoucestně usměrněného signálu a verifikovány výsledky tohoto experimentálního měření.

5.1 Experimentální měření

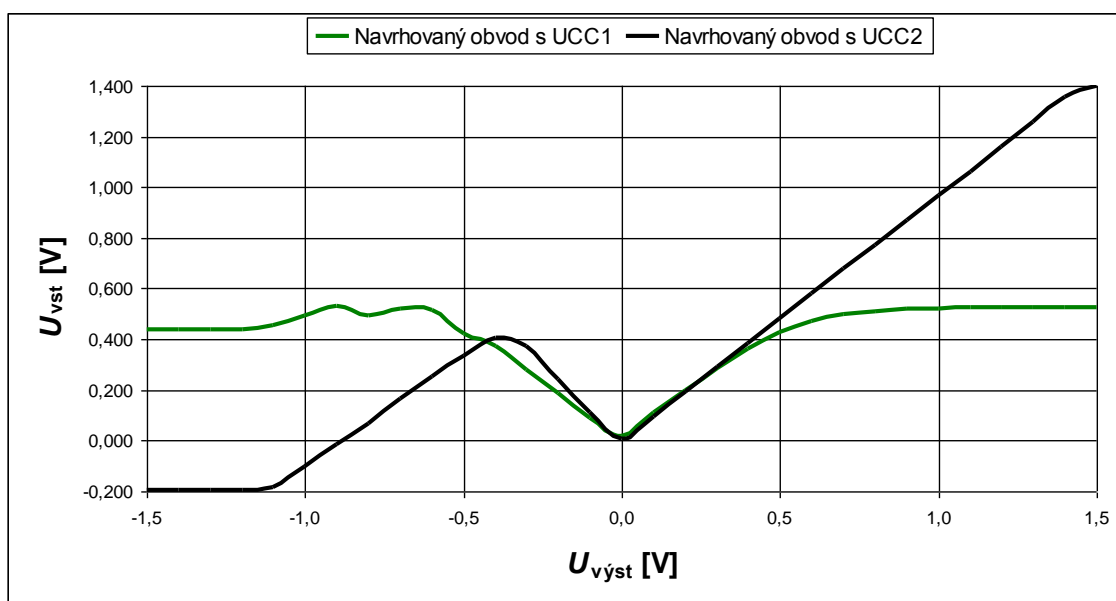
Celkem byly realizovány 4 přípravky, které se skládaly z dvou původních známých obvodů (Obr. 3.10 a Obr. 3.16) a dvou navrhovaných řešení (Obr. 4.1 a Obr. 4.4). Pro každý takto realizovaný obvod byly naměřeny převodové charakteristiky celkové v rozsahu výstupního napětí $-1,5\text{ V}$ až $+1,5\text{ V}$ zobrazené na Obr. 5.1 a Obr. 5.3 a kolem oblasti nuly v rozsahu výstupního napětí -150 mV až $+150\text{ mV}$ zobrazené na Obr. 5.2 a Obr. 5.4 u všech obvodů na přesném kalibračním přístroji Digistant 4422. Poté je vyhodnocena přesnost těchto realizovaných přípravků a porovnány původní obvody s nově navrhovanými obvody. Taktéž byly hlavně porovnány navrhované obvody bez řídicího proudu a s řídicím proudem (Obr. 5.5 a Obr. 5.6).



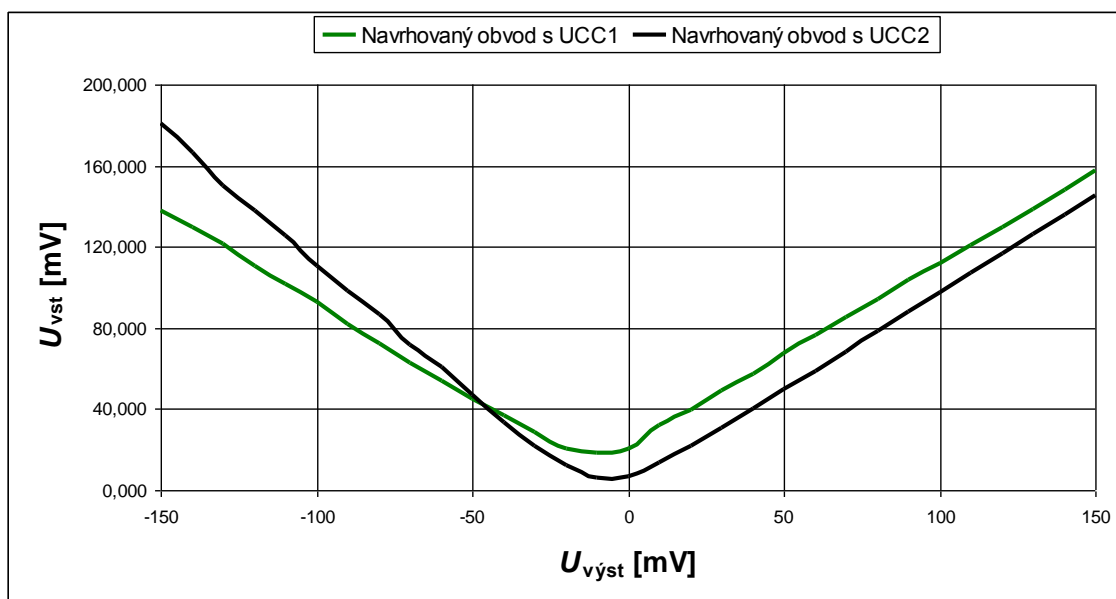
Obr. 5.1: Srovnání převodových charakteristik původních obvodů a navrhovaných obvodů s UCC bez řízení diod.



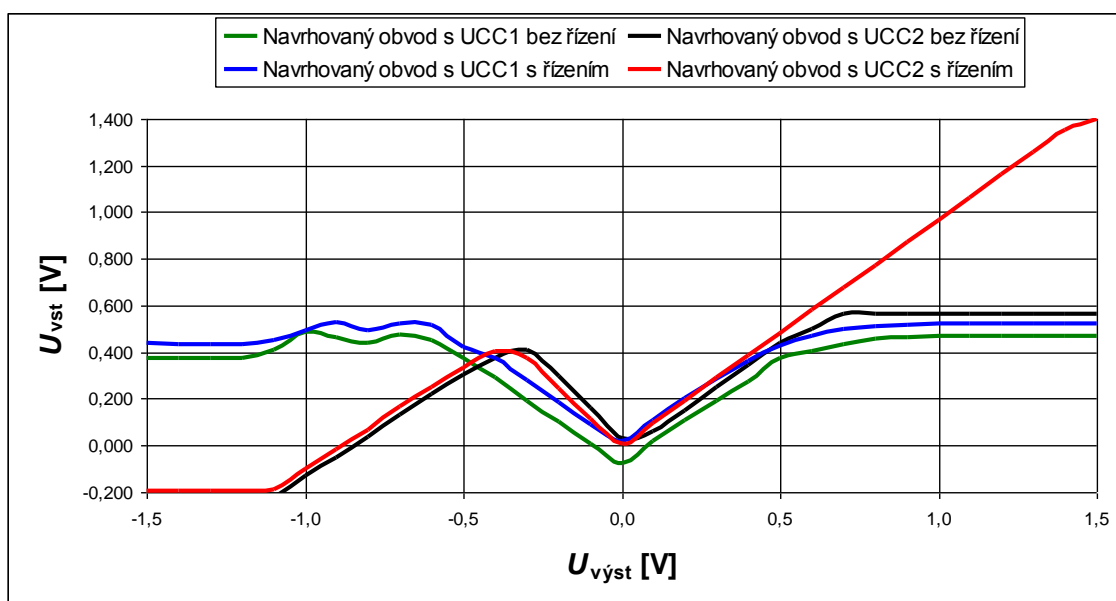
Obr. 5.2: Srovnání převodových charakteristik v oblasti nulového přenosu původních obvodů a navrhovaných obvodů s UCC bez řízení diod.



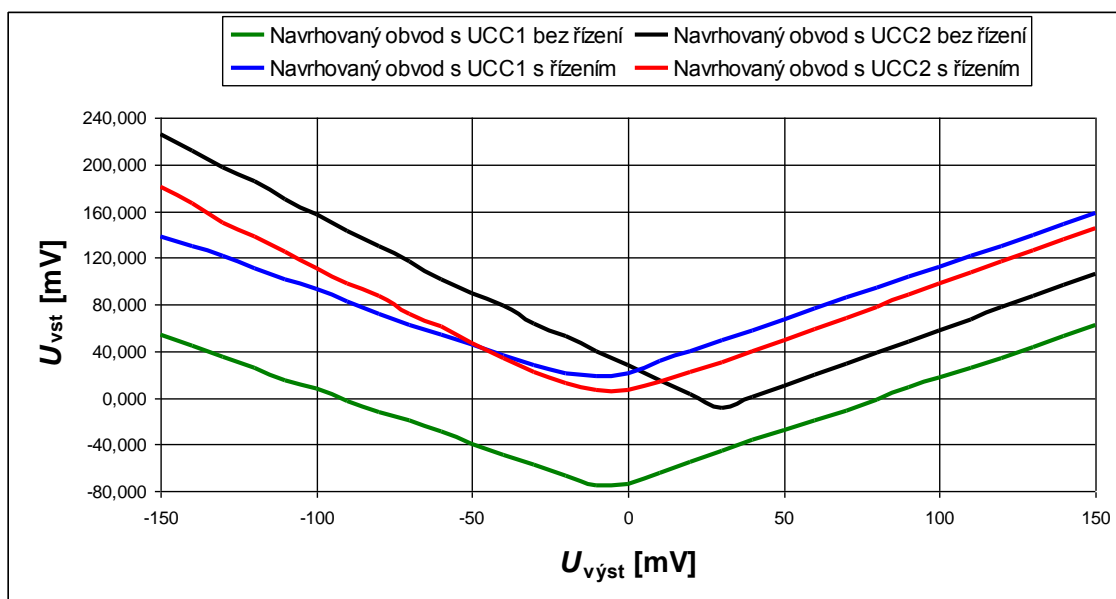
Obr. 5.3: Srovnání převodových charakteristik navrhovaných obvodů s UCC s řídicím proudem $I_R = 20 \mu A$.



Obr. 5.4: Srovnání převodových charakteristik v oblasti nulového přenosu navrhovaných obvodů s UCC s řídicím proudem $I_R = 20 \mu A$.



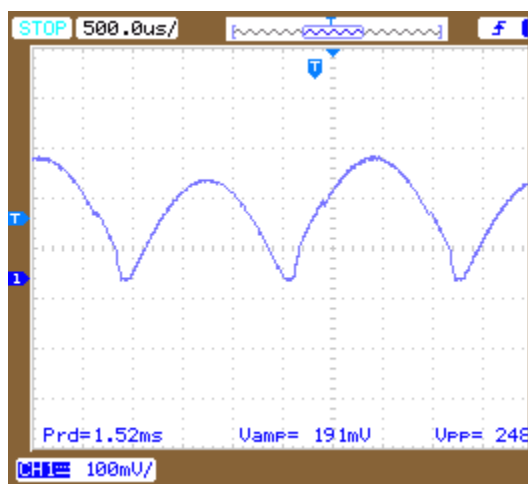
Obr. 5.5: Srovnání převodových charakteristik navrhovaných obvodů s UCC bez řídicího proudu a s řídicím proudem $I_R = 20 \mu A$.



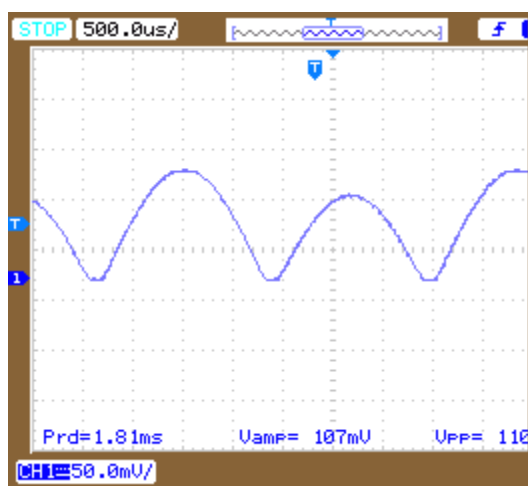
Obr. 5.6: Srovnání převodových charakteristik v oblasti nulového přenosu navrhovaných obvodů s UCC bez řídicího proudu a s řídicím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.

Dále byly experimentálně naměřeny charakteristiky dvoucestně usměrněného výstupního napětí na osciloskopu pro každý obvod při určitých amplitudách sinusového vstupního signálu na určité frekvenci. Pro první původní obvod využívající dvou proudových konvektorů CCII+ (Obr. 5.7, Obr. 5.8, Obr. 5.9) a první navrhovaný obvod s UCC bez řídicího proudu (Obr. 5.13, Obr. 5.14, Obr. 5.15) a s řídicím proudem (Obr. 5.16, Obr. 5.17, Obr. 5.18) byly zvoleny amplitudy vstupního sinusového signálu 100 mV_{pp} , 250 mV_{pp} a 500 mV_{pp} při frekvencích 300 kHz, 1 MHz a 3 MHz. Pro druhý původní obvod se dvěma operačními zesilovači (Obr. 5.10, Obr. 5.11, Obr. 5.12) a druhý navrhovaný obvod s UCC bez řídicího proudu (Obr. 5.19, Obr. 5.20, Obr. 5.21) a s řídicím proudem (Obr. 5.22, Obr. 5.23, Obr. 5.24) byly zvoleny amplitudy vstupního sinusového signálu 400 mV_{pp} , 600 mV_{pp} a 800 mV_{pp} při frekvencích 30 kHz, 100 kHz a 300 kHz.

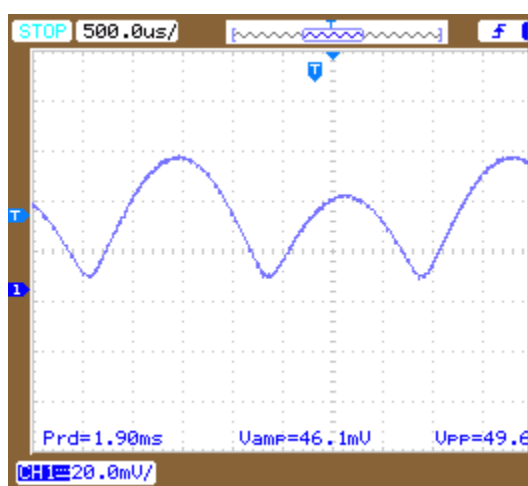
5.1.1 První původní obvod



a)

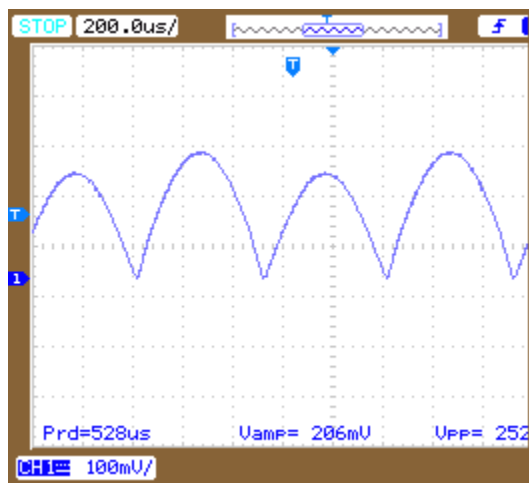


b)

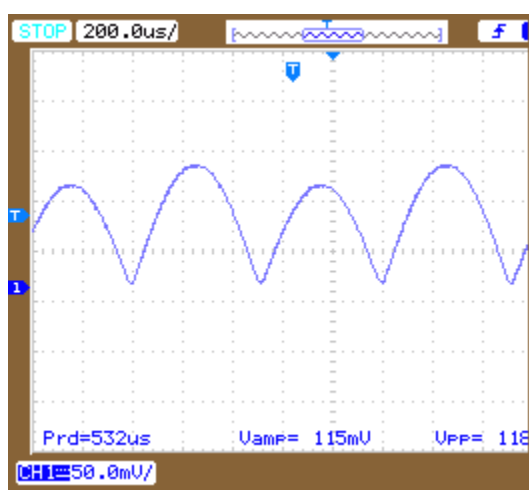


c)

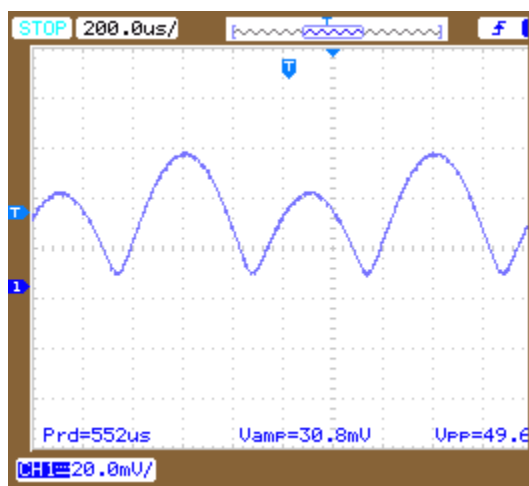
Obr. 5.7: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 300 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp}.



a)

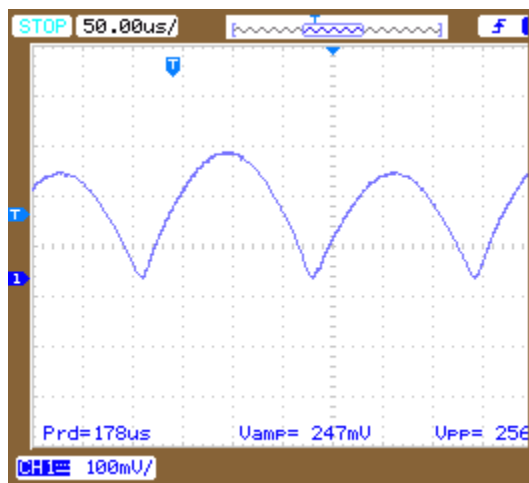


b)

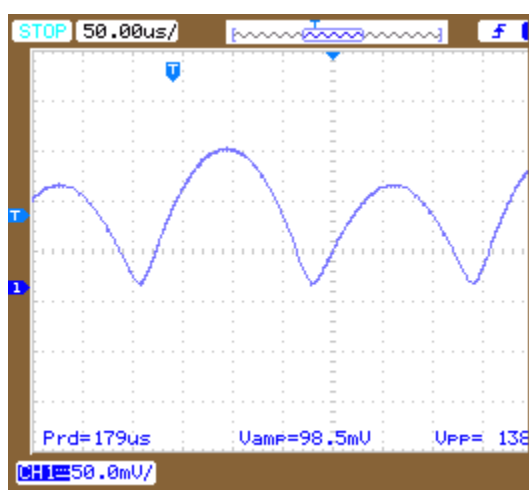


c)

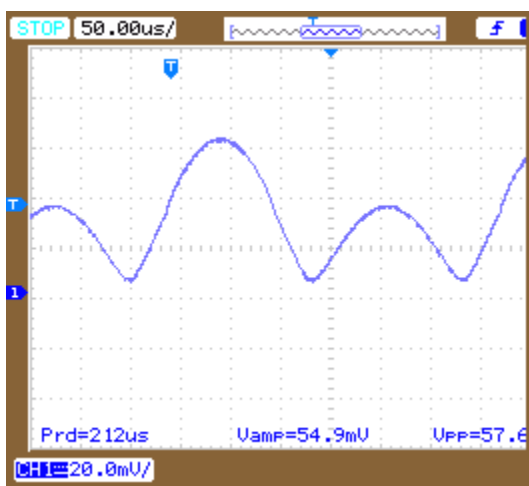
Obr. 5.8: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 1 MHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp}.



a)



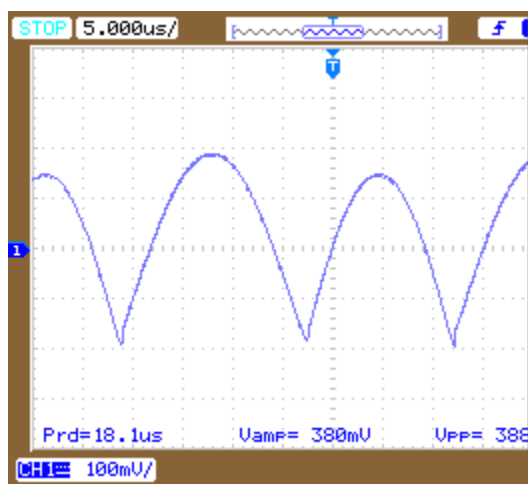
b)



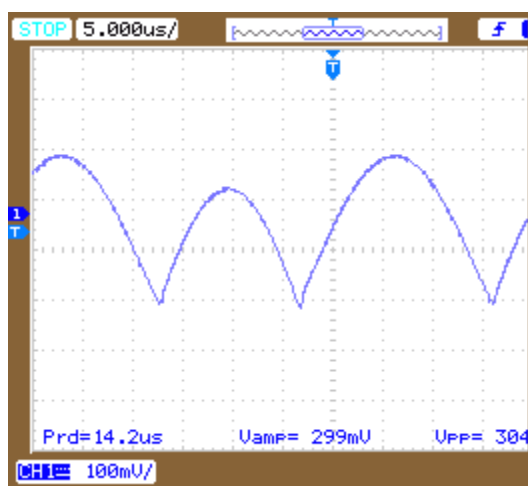
c)

Obr. 5.9: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 3 MHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp}.

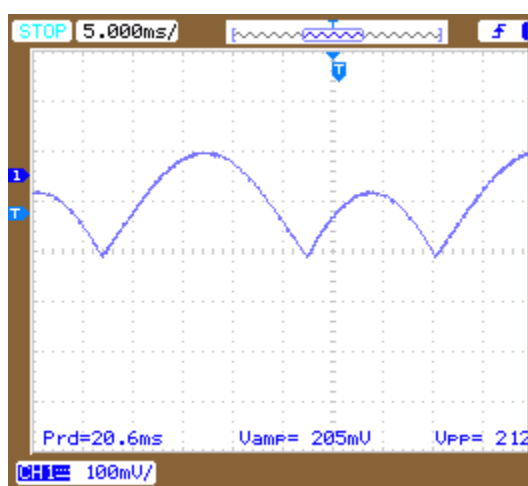
5.1.2 Druhý původní obvod



a)

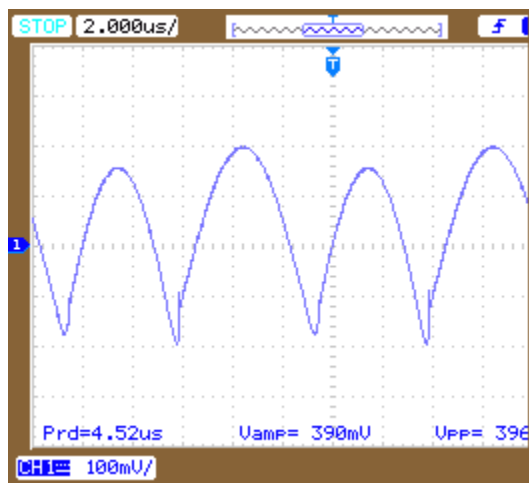


b)

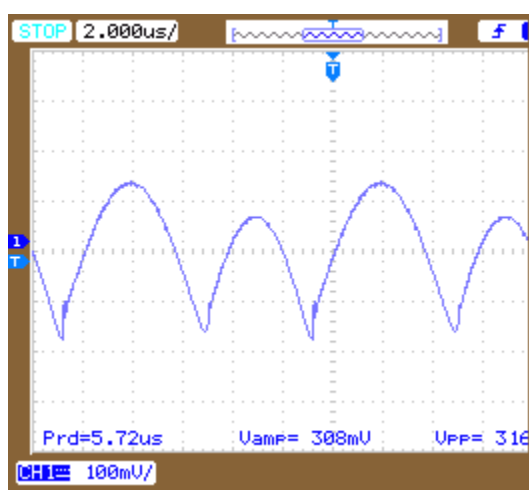


c)

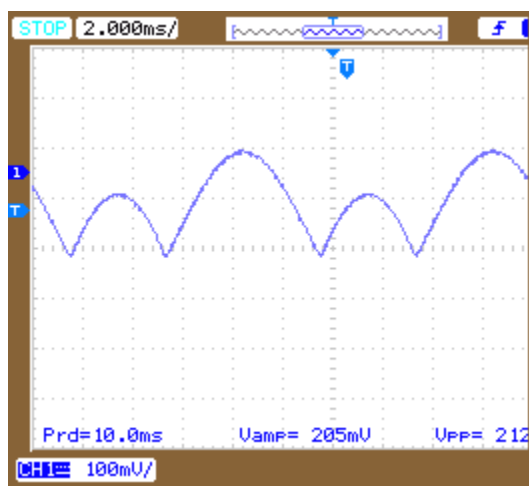
Obr. 5.10: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 30 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp}.



a)

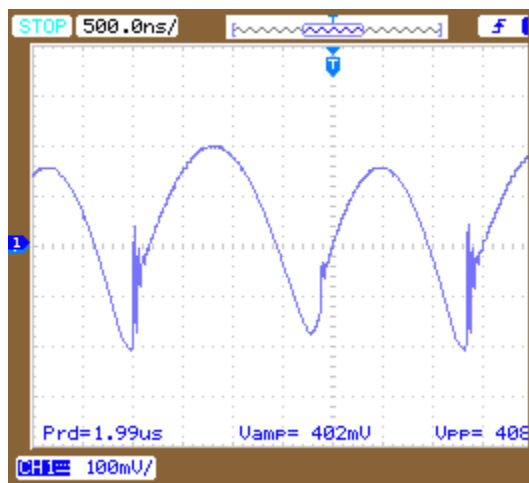


b)

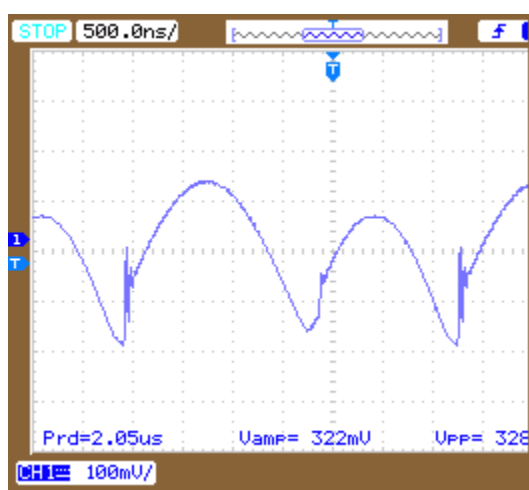


c)

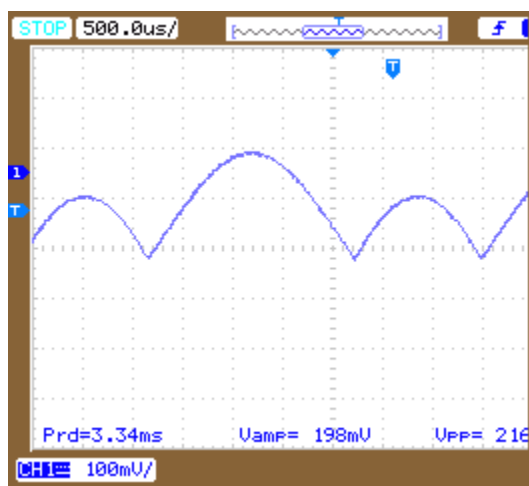
Obr. 5.11: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 100 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp}.



a)



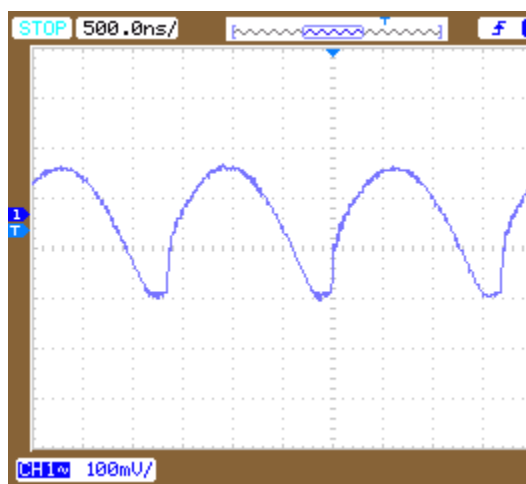
b)



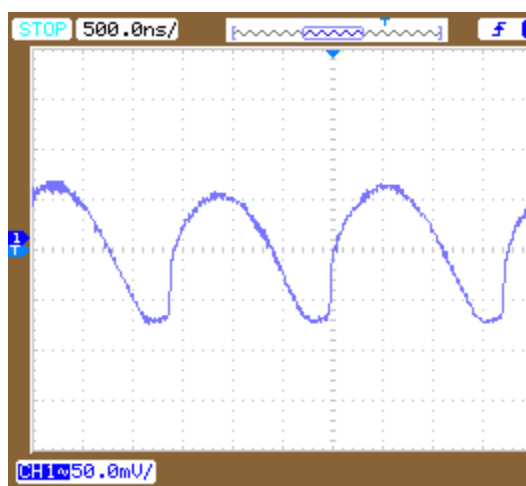
c)

Obr. 5.12: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 300 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp}.

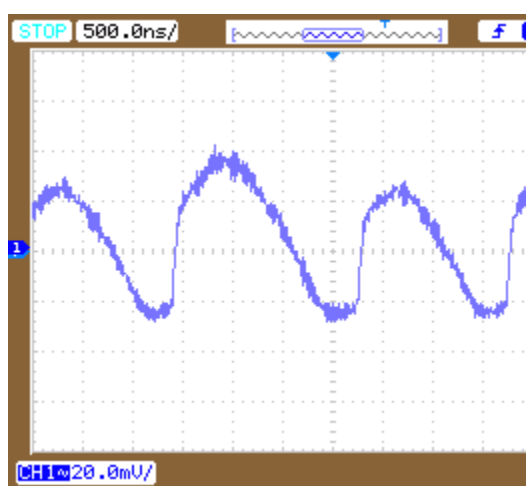
5.1.3 První navrhovaný obvod s UCC



a)

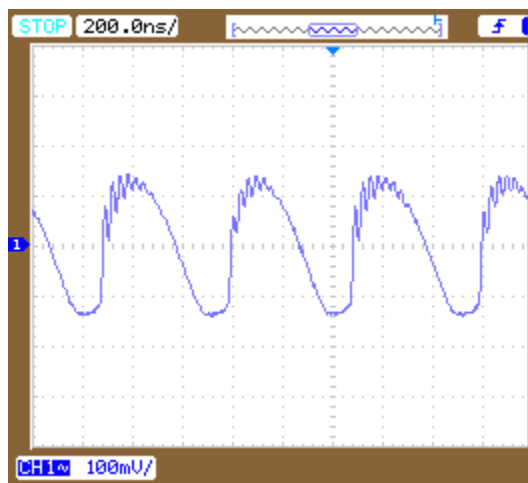


b)

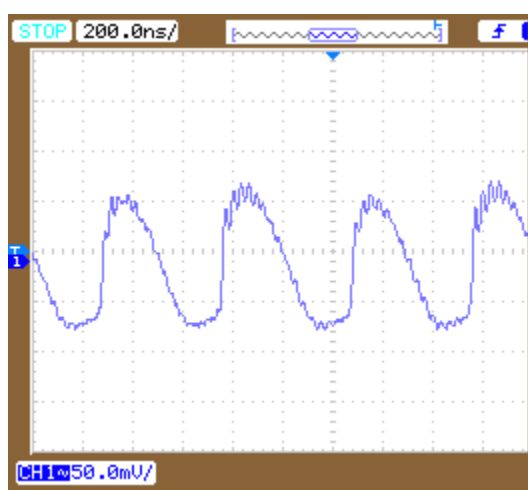


c)

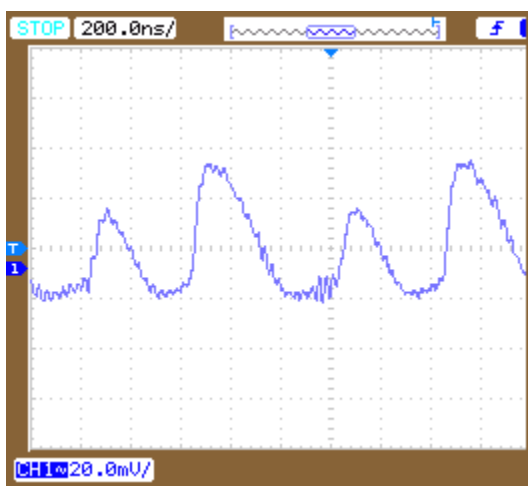
Obr. 5.13: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 300 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp} bez řídicího proudu I_R .



a)

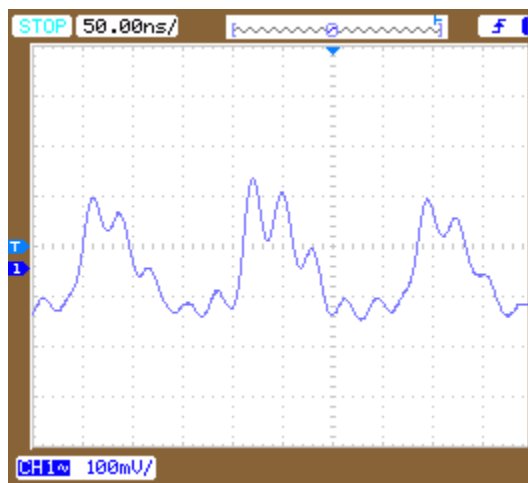


b)

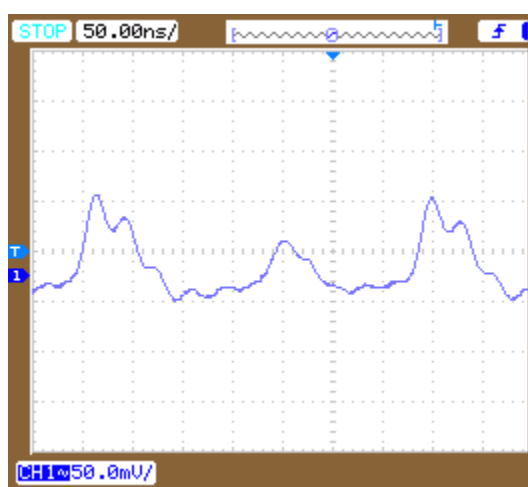


c)

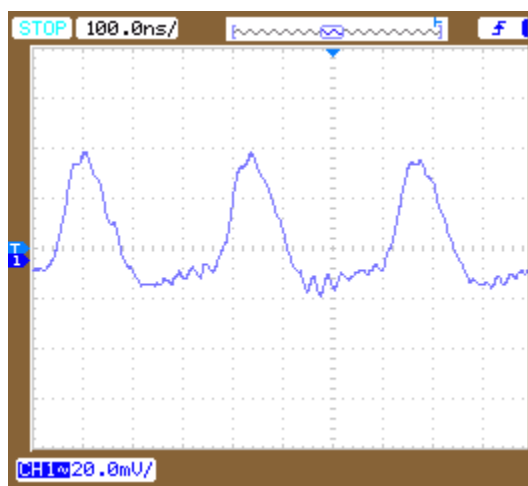
Obr. 5.14: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 1 MHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp} bez řídicího proudu I_R .



a)

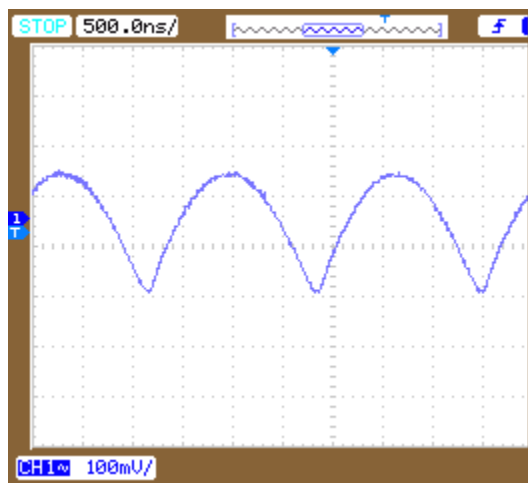


b)

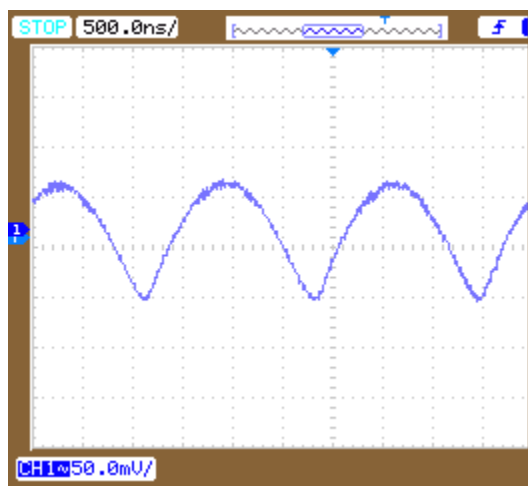


c)

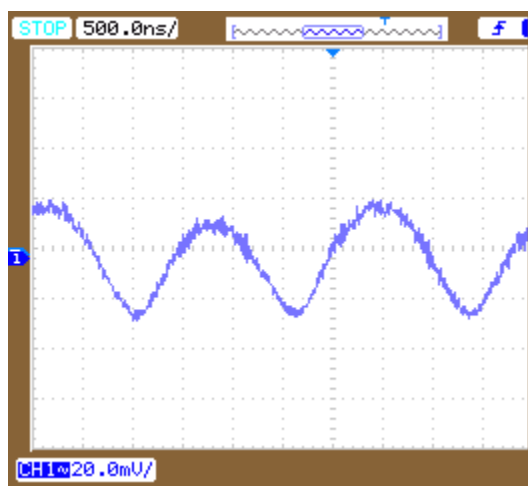
Obr. 5.15: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 3 MHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp} bez řídicího proudu I_R .



a)

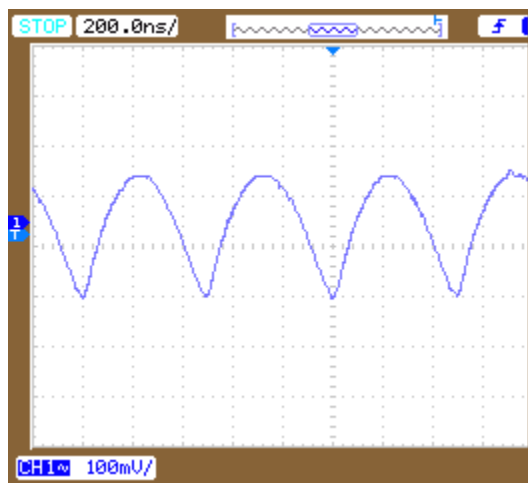


b)

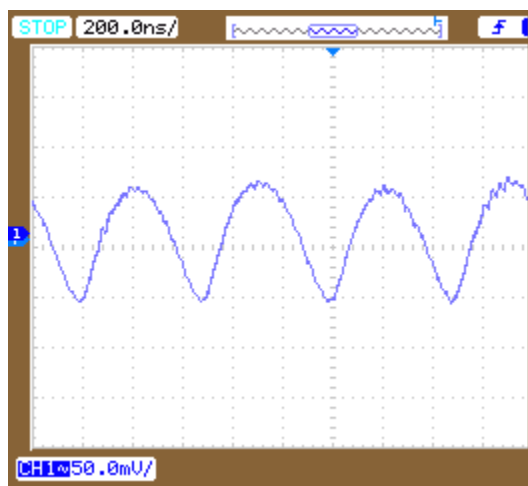


c)

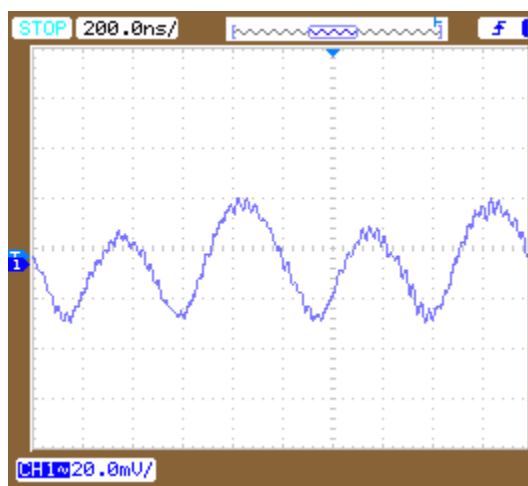
Obr. 5.16: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 300 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp} s řídícím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.



a)

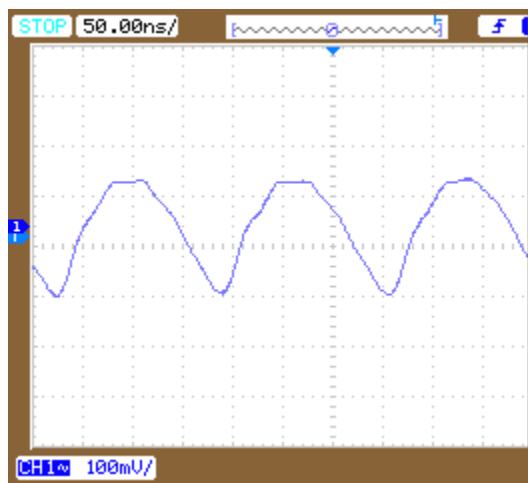


b)

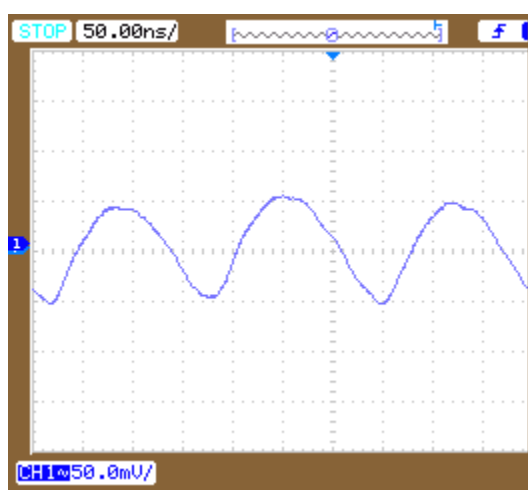


c)

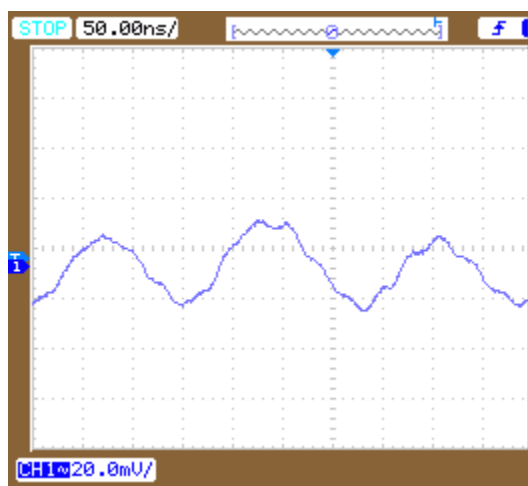
Obr. 5.17: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 1 MHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp} s řídícím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.



a)



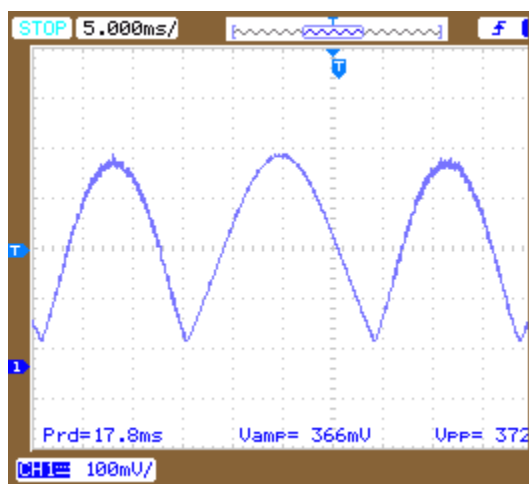
b)



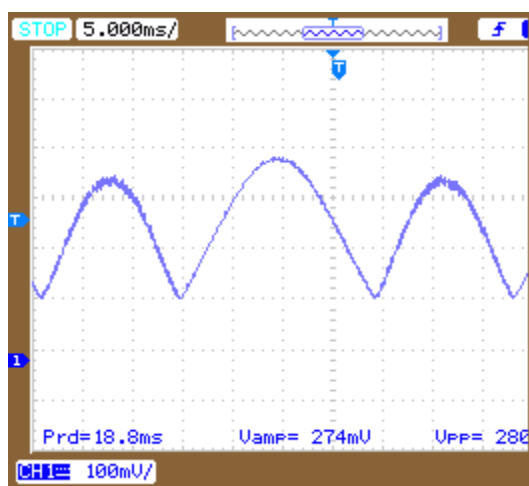
c)

Obr. 5.18: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 3 MHz s amplitudou vstupního signálu a) 500 mV_{pp}, b) 250 mV_{pp}, c) 100 mV_{pp} s řídícím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.

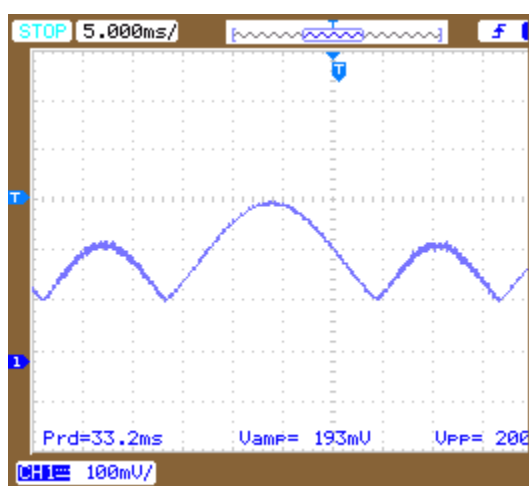
5.1.4 Druhý navrhovaný obvod s UCC



a)

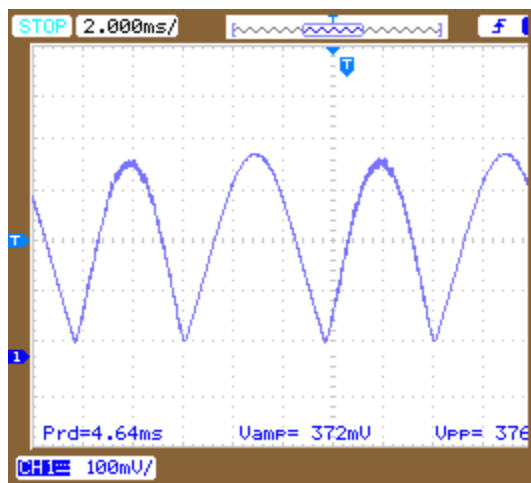


b)

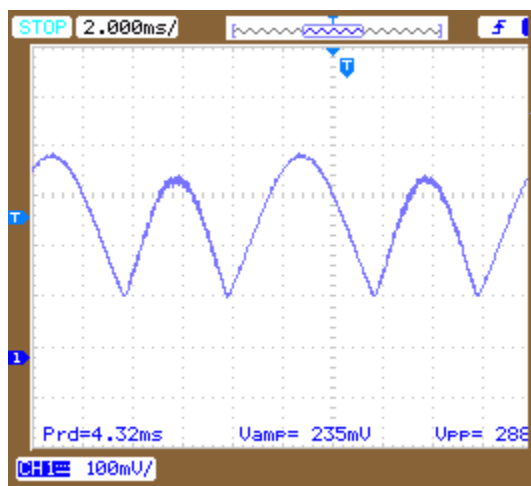


c)

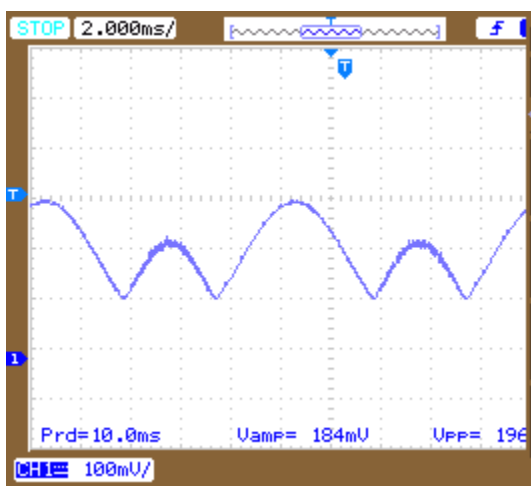
Obr. 5.19: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 30 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp} bez řídicí proudu I_R .



a)

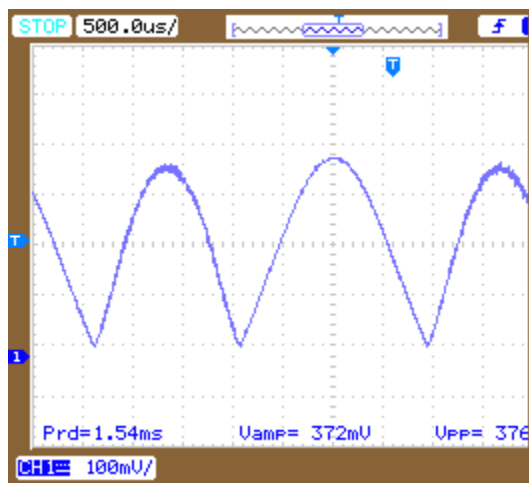


b)

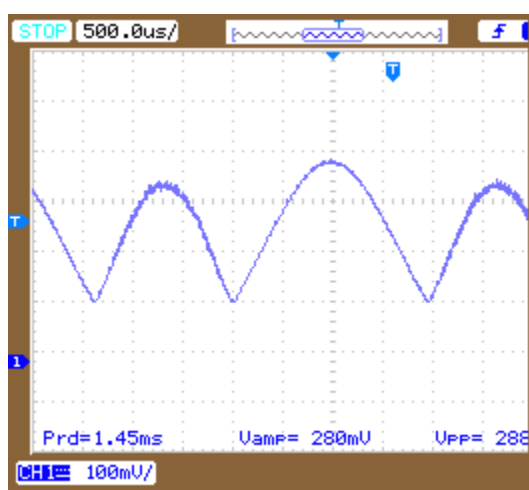


c)

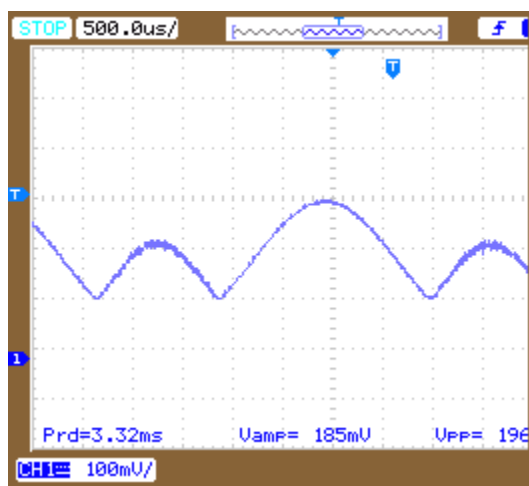
Obr. 5.20: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 100 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp} bez řídicí proudu I_R .



a)

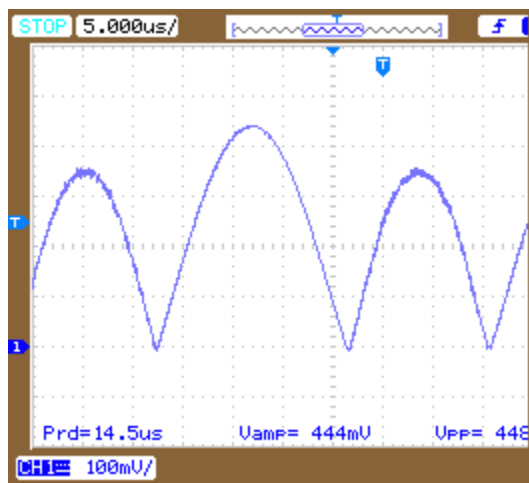


b)

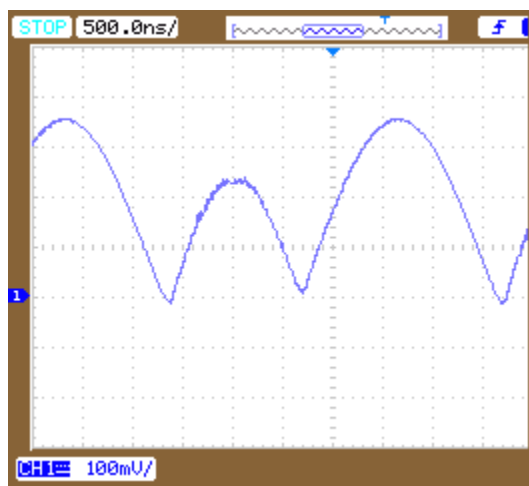


c)

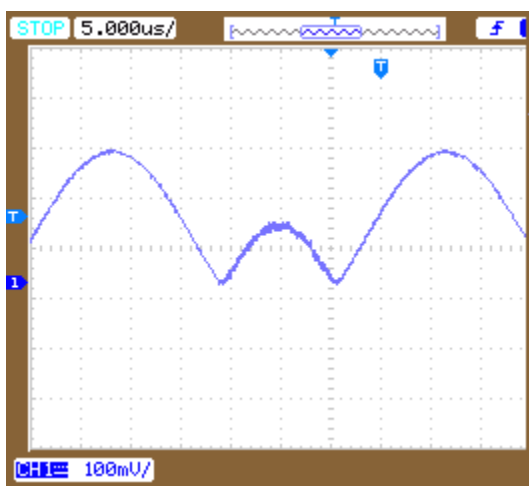
Obr. 5.21: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 300 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp} bez řídicí proudu I_R .



a)

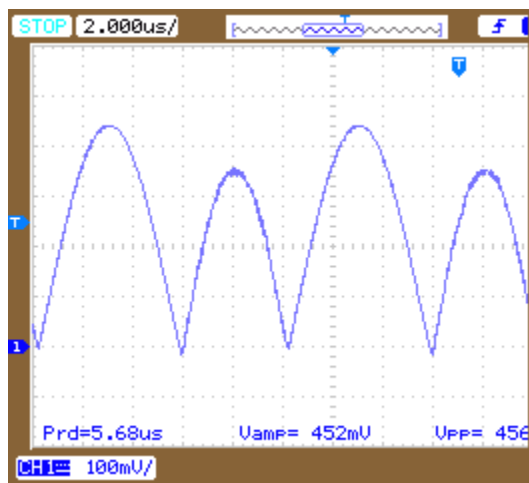


b)

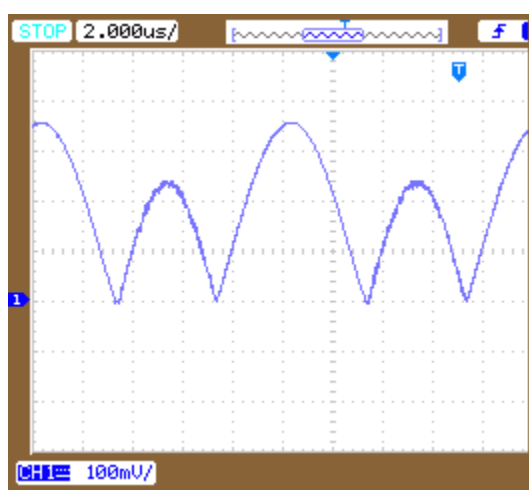


c)

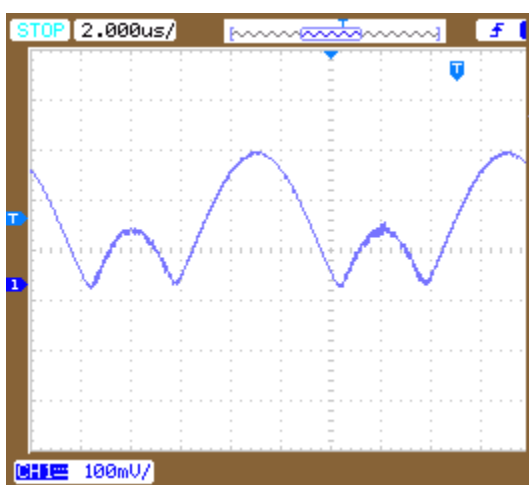
Obr. 5.22: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 30 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp} s řídícím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.



a)

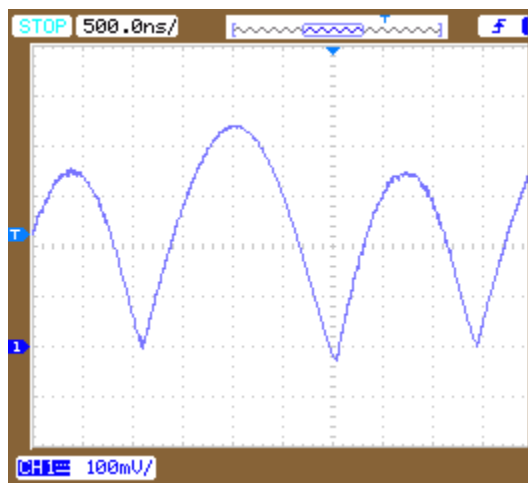


b)

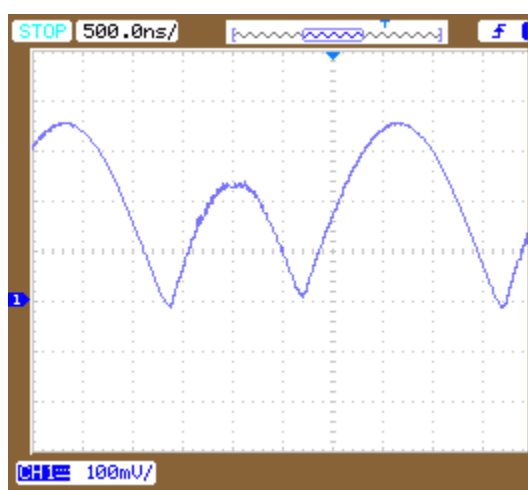


c)

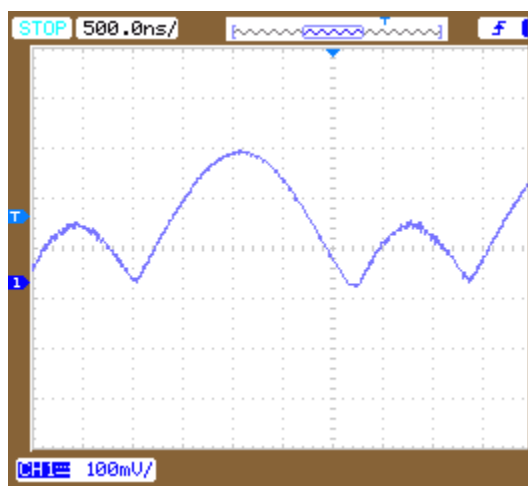
Obr. 5.23: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 100 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp} s řídícím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.



a)



b)



c)

Obr. 5.24: Výstupní průběhy dvoucestně usměrněného signálu při frekvenci 300 kHz s amplitudou vstupního signálu a) 800 mV_{pp}, b) 600 mV_{pp}, c) 400 mV_{pp} s řídícím proudem $I_R = 20 \mu\text{A}$.

5.2 Verifikace výsledků

V realizovaných obvodech bylo dosaženo nejlepších výsledků za pomoci menších změn hodnot rezistorů než je uvedeno ve schématech v kapitole 3 a kapitole 4. V prvním původním obvodu byly hodnoty rezistorů ponechány. Ve druhém původním obvodu byly pozměněny tři rezistory o hodnotách 1k na hodnotu 1k1 a dva na hodnotu 1k3. První navrhovaný obvod zůstal beze změn hodnot rezistorů. Ve druhém navrhovaném obvodu došlo ke třem změnám hodnot rezistorů, kde paralelní kombinace rezistorů 1k byla pozměněna na hodnotu 510 a dva rezistory 1k byly pozměněny na 1k2 a 2k. Všechny tyto změny jsou uvedeny v příloze.

Z převodových charakteristik na Obr. 5.1 lze zjistit, že první původní obvod z Obr. 3.16 a druhý navrhovaný obvod z Obr. 4.4 mají docela přesnou převodovou charakteristiku, zatímco v druhém původním obvodu a prvním navrhovaném obvodu je už vidět vliv stejnosměrné složky. Na převodové charakteristice v oblasti nulového přenosu na Obr. 5.2 zjistíme, že na druhém původním obvodu se projevuje nejvíce stejnosměrná složka, která je od nuly také posunuta, jak v ose x (výstupní napětí), tak i v ose y (vstupní napětí). První navrhovaný obvod si udržuje v ose y (vstupní napětí) oblast 0, zatímco na ose y (vstupní napětí) je stejnosměrně posunut o -75 mV. První původní obvod a druhý navrhovaný obvod jsou víceméně posunuty pouze v ose x (výstupní napětí) o přibližně stejnou hodnotu doleva, resp. doprava. Pokud si porovnáme převodové charakteristiky na Obr. 5.3 a Obr. 5.4 s řízením diod s převodovými charakteristikami bez řízení u navrhovaných obvodů, zjistíme vylepšení vlastností v oblasti nulového přenosu, kde druhý navrhovaný obvod má stejnosměrnou složku 6 mV a první navrhovaný obvod stejnosměrnou složku 19 mV. Z hlediska převodových charakteristik jsou navrhované obvody s proudovým řízením rozhodně lepší než obvody původní a zároveň je i druhý navrhovaný obvod o něco lepší než první navrhovaný. Hlavní porovnání spočívá v navrhovaných obvodech bez proudového řízení a s proudovým řízením, jak lze pozorovat na Obr. 5.5 a v oblasti nuly na Obr. 5.6. Jak je vidět, navrhovaná řešení s proudovým řízením rozhodně vykazuje vylepšení vlastností obvodu než bez proudového řízení a také menší stejnosměrné napětí.

Když porovnáme příslušné realizované obvody z hlediska charakteristiky výstupního dvoucestně usměrněného napětí, lze si povšimnout horších vlastností obou navrhovaných obvodů bez použití řídicího proudu než původních obvodů. Alespoň v případě prvního navrhovaného obvodu, kde je to zřetelně vidět oproti prvnímu

původnímu obvodu. Dále si lze povšimnout různě širokých dvoucestně usměrněných amplitud v druhém původním a druhém navrhovaném obvodu oproti prvním obvodům. Na experimentálně naměřených charakteristikách výstupních napětí je také vidět nejen vliv zotavovací doby diody na vyšších frekvencích, ale i vliv parazitního odporu na proudovém vstupu proudového konvejeoru v případě malých amplitudách vstupního sinusového signálu. Po zavedení řídicího proudu se výstupní průběhy u navrhovaných obvodů zlepšily a na vyšších frekvencích se méně projevovala zotavovací doba diody. Konečným verdiktem lze tedy konstatovat, že navrhované obvody mají rozhodně lepší vlastnosti v oblasti převodových charakteristik, tak i v oblasti výstupního dvoucestně usměrněného signálu za použití řídicího stejnosměrného proudu.

6 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly vytvořeny dvě nová obvodová řešení univerzálních přesných dvoucestných usměrňovačů s využitím aktivního prvku univerzálního proudového konveju (UCC). Na základě simulací a realizací jsou vyhodnoceny poznatky nových obvodových řešení a porovnána s původními přesnými usměrňovači.

Charakteristiky výstupních průběhů byly simulovány v prostředí OrCad. Hlavním obvodovým prvkem je univerzální proudový konveju, který nabízí širokou škálu nabízeného aplikačního využití. Dalšími prvky použitých v simulovaných obvodech jsou operační zesilovač THS4051, proudový konveju OPA861, rezistory, diody 1N4148 a řízený proudový zdroj.

Z těchto simulací byly pak realizovány původní a navrhované obvody do podoby desek plošných spojů za použití prvku univerzálního proudového konveju, operačních zesilovačů THS4051 a THS4052, proudového konveju OPA861, rezistorů, kondenzátorů a vysokofrekvenčních diod 1N4148. Všechny tyto desky plošných spojů se soupisem použitých součástek jsou uvedeny v příloze. Celkově byly realizovány čtyři přípravky, kde dva byly známé původní obvody a dva nová navrhovaná řešení vycházející z původních obvodů. Na pracovišti bylo provedeno rozsáhlé experimentální měření výstupních dvoucestně usměrňovaných signálů a také naměřeny převodové charakteristiky na realizovaných přípravcích a porovnány mezi sebou. Během měření bylo nutné provést několik úprav pro co nejlepší možné výsledky. Ovlivňování konečných výsledků způsobovalo mírný šum na BNC kabelech, různé vlastnosti a chování součástek (některé hodnoty rezistorů musely být pozměněny, špatná funkčnost operačních zesilovačů nebo nedostatečné umístění UCC do patice).

Cílem tedy bylo vytvoření nových obvodových řešení s použitím univerzálního proudového konveju (UCC). Lepších vlastností navrhovaných obvodů bylo dosaženo za pomoci proudového řízení, které umožnilo rychlejší spínání diod udržující blíže hranici propustného stavu. V případě nových obvodových řešení by se dal považovat druhý navrhovaný obvod za lepší než druhý původní obvod, z něhož vycházel.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AWAD, Inas A. Inverting second generation current conveyors: the missing building blocks, CMOS realizations and applications. *International Journal of Electronics* [online]. 1999, vol. 86, no. 4, p. 413–432 [cit. 2012-11-29]. ISSN 0020-7217. DOI: 10.1080/002072199133337. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/002072199133337>
- [2] ČAJKA, Josef, Tomáš DOSTÁL a Kamil VRBA. General view on current conveyors. *International Journal of Circuit Theory and Applications* [online]. West Sussex: John Wiley, 2004, no. 3, p. 133–138 [cit. 2012-11-29]. ISSN 0098-9886. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1072687>
- [3] ELWAN, H.O. a A.M. SOLIMAN. A novel CMOS current conveyor realization with an electronically tunable current mode filter suitable for VLSI. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing* [online]. 1996, vol. 43, no. 9, p. 663–670 [cit. 2012-11-29]. ISSN 10577130. DOI: 10.1109/82.536763. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=536763>
- [4] FABRE, Alain. Third-generation current conveyor: a new helpful active element. *Electronics Letters*. 1995, vol. 31, no. 5, p. 338–339. ISSN 00135194.
- [5] GIFT, Stephan J. G. a Brent MAUNDY. Versatile Precision Full-Wave Rectifiers for Instrumentation and Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007, vol. 56, no. 5, p. 1703–1710. ISSN 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2007.904565. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4303403>
- [6] HAYATLEH, K., S. PORTA a F.J. LIDGEY. Temperature independent current conveyor precision rectifier. *Electronics Letters*. 1994, vol. 30, no. 25, p. 2091–2093. ISSN 00135194. DOI: 10.1049/el:19941454. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/ELLEAK/v30/i25/p2091/s1>

- [7] JEŘÁBEK, Jan. *Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky* [online]. Brno, 2011, 11. července 2011 [cit. 2012-11-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=41950. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Kamil Vrba.
- [8] JEŘÁBEK, Jan a Kamil VRBA. Current-mode tunable and adjustable filter with digitally adjustable current amplifier and transconductance amplifiers. In: *Proceedings of the European Conference of Circuits Technology and Devices, ECCTD'10*. Puerto de la Cruz: Španělsko, 2010, p. 101–104.
- [9] JEŘÁBEK, Jan a Kamil VRBA. Filters Based on Active Elements with Current Mirrors and Inverters. *International Transactions on Communication and Signal Processing*. 2006, vol. 8, no. 1, p. 1–8. ISSN 1738-9682.
- [10] KOTON, Jaroslav, Norbert HERENCŠÁR, Jan JEŘÁBEK a Kamil VRBA. Fully Differential Current-Mode Band-Pass Filter: Two Design Solutions. In: *33th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervező, 2010, p. 1–4. ISBN 978-963-88981-0-4.
- [11] LIU, Shen-Iuan, Jiann-Jong CHEN a Yuh-Shyan HWANG. New current mode biquad filters using current followers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1995, vol. 42, no. 7, p. 380–383. ISSN 10577122. DOI: 10.1109/81.401150. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=401150>
- [12] SEDRA, A. a K. SMITH. A second-generation current conveyor and its applications. *IEEE Transactions on Circuit Theory* [online]. 1970, vol. 17, no. 1, p. 132–134 [cit. 2012-11-29]. ISSN 0018-9324. Dostupné z: <http://www.eecg.toronto.edu/~pagiamt/kcsmith/sedra-smith-second-generation-current-conveyor.pdf>

- [13] SMITH, K.C. a A. SEDRA. The current conveyor: A new circuit building block. *Proceedings of the IEEE* [online]. 1968, vol. 56, no. 8, p. 1368–1369 [cit. 2012-11-29]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://www.eecg.toronto.edu/~pagiamt/kcsmith/smith-sedra-current-conveyor.pdf>
- [14] SOULIOTIS, George, Angelos CHRISANTHOPOULOS a Ioannis HARITANTIS. Current differential amplifiers: new circuits and applications. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 2001, vol. 29, no. 6, p. 553–574. ISSN 0098-9886. DOI: 10.1002/cta.171. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cta.171>
- [15] TANGSRIRAT, Worapong a Danucha PRASERTSOM. Electronically tunable low-component-count current-mode biquadratic filter using dual-output current followers. *Electrical Engineering*. 2007-11-8, vol. 90, no. 1, p. 33–37. ISSN 0948-7921. DOI: 10.1007/s00202-006-0051-1. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00202-006-0051-1>
- [16] TOUMAZOU, C., F.J. LIDGEY a S. CHATTONG. High frequency current conveyor precision full-wave rectifier. *Electronics Letters*. 1994, vol. 30, no. 10, p. 745–746. ISSN 00135194. DOI: 10.1049/el:19940539. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/ELLEAK/v30/i10/p745/s2>
- [17] VRBA, Kamil a Norbert HERENCŠÁR. Přeladitelné filtry s OTA zesilovači. *Elektrorevue – Internetový časopis* [online]. 17.07.2007, č. 28, s 1–12 [cit. 2012-11-26]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/35/preladitelne-filtry-s-ota-zesilovaci/>

- [18] VRBA, Kamil a Jan JEŘÁBEK. Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konveju, ukázka návrhu aplikace. *Elektrorevue – Internetový časopis* [online]. 24.10.2006, č. 41, s. 1–9 [cit. 2012-11-26]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/40/vybrane-vlastnosti-univerzalniho-proudoveho-konveju--ukazka-navrhu-aplikace/>
- [19] VRBA, Kamil a David KUBÁNEK. Přesné usměrňovače s proudovým buzením diod a vliv závěrné zotavovací doby diod na jejich funkci. *Elektrorevue – Internetový časopis* [online]. 15.02.2010, č. 6, s. 1–6 [cit. 2012-11-26]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/10/presne-usmernovace-s-proudovym-buzenim-diod-a-vliv-zaverne-zotavovaci-doby-diod-na-jejich-funkci/>
- [20] VRBA, Kamil, Václav ZEMAN, Daniel BEČVÁŘ a Vladislav MUSIL. Novel universal active block: a universal current conveyor. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Emerging Technologies for the 21st Century. Proceedings (IEEE Cat No.00CH36353)* [online]. Presses Polytech. Univ. Romandes, 2000, s. 471–474 [cit. 2012-11-26]. DOI: 10.1109/ISCAS.2000.856099. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=856099>
- [21] WENG, Ro-Min a Maw-Huei LEE. Novel universal biquad filters using only three followers. *International Journal of Electronics*. 1997, vol. 82, no. 6, p. 621–628. ISSN 0020-7217. DOI: 10.1080/002072197135779. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/002072197135779>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BOTA	operační transkonduktanční zesilovač s diferenčním výstupem, balanced-output operational tranconductance amplifier
CA	proudový zesilovač, current amplifier
CC	proudový konvektor, current conveyor
CCCS	zdroj proudu řízený proudem, current controlled current source
CCI	proudový konvektor první generace
CCII	proudový konvektor druhé generace
CCII+/-	proudový konvektor druhé generace s dvěma výstupy
CCIII+	proudový konvektor třetí generace
CF	proudový sledovač, current follower
DACA	digitálně říditelný proudový zesilovač, digitally adjustable current amplifier
DO-CA	dvouvýstupový proudový zesilovač, dual-output current amplifier
DO-CF	dvouvýstupový proudový sledovač, dual-output current follower
GCC	obecný proudový konvektor, general current conveyor
ICCI	invertovaný proudový konvektor druhé generace
MO-CF	vícévýstupový proudový sledovač, multiple-output current follower
MOTA	operační transkonduktanční zesilovač s více výstupy, multiple-output operational tranconductance amplifier
OTA	operační transkonduktanční zesilovač, operational tranconductance amplifier
OZ	operační zesilovač
UCC	univerzální proudový konvektor, universal current conveyor
VCCS	napětím řízený zdroj proudu, voltage-controlled current source
VCVS	napětím řízený zdroj napětí, voltage-controlled voltage source

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

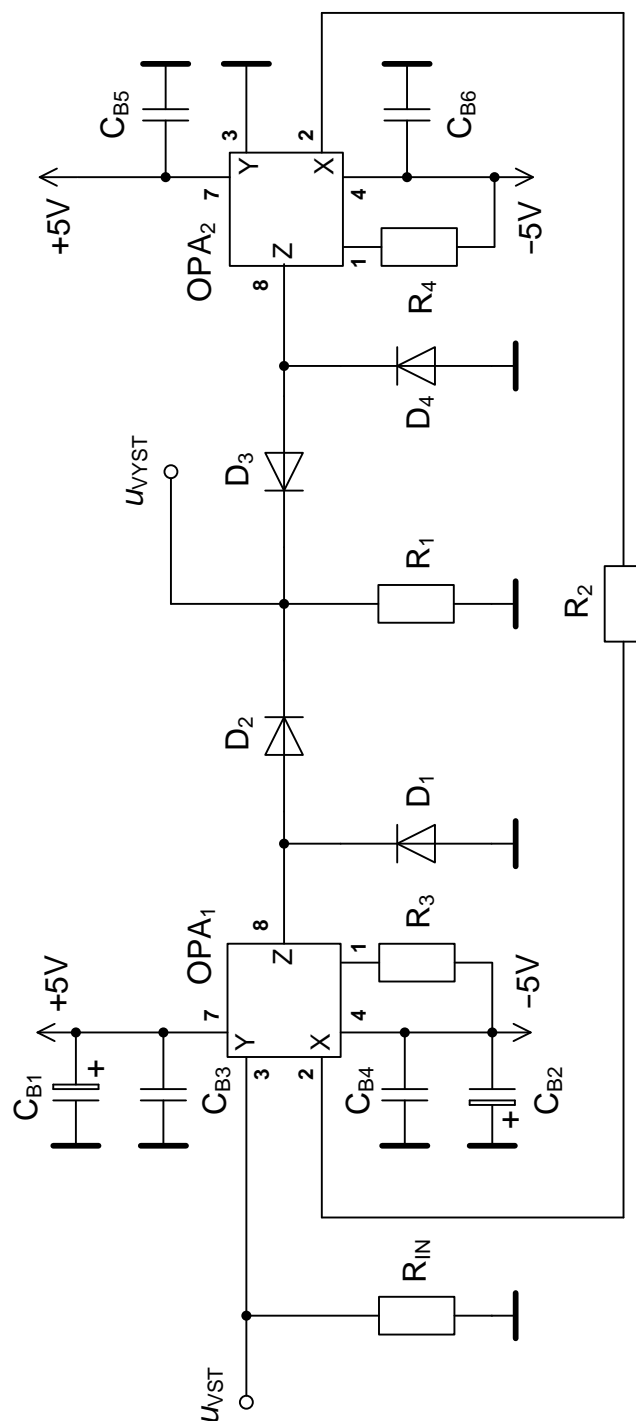
A	zesílení prvku DO-CA
a, b, c	koefficienty přenosu u obecného proudového konvejeoru
$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6,$ D_7, D_8	vysokofrekvenční diody
f	frekvence [Hz]
g_m	transkonduktance [S]
i	branový proud aktivního prvku [A]
I_B, I_R	stejnoseměrný řídící proud [A]
i_d	proud procházející diodou [A]
$i_d(t)$	funkce proudu procházejícího diodou v čase [A]
i_{obv}	proud tekoucí obvodem usměřovače [A]
i_{SET}	řídící proud aktivního prvku [A]
I_Z	stejnoseměrný zbytkový proud [A]
N	polovodič typu N (elektrony)
P	polovodič typu P (díry)
PN	přechod PN polovodičových prvků
R	odpor [Ω]
R_1, R_2, R_3, R_4, R_5	rezistor
r_X	parazitní odpor invertovaného vstupu CCII+ [Ω]
t	čas [s]
t_d	doba nabíjení parazitní kapacity a ustálení napětí na diodě, delay time [s]
t_k	závěrná zotavovací doba diody [s]
t_s	doba odvádění minoritních nosičů z přechodu, storage time [s]
u	branové napětí aktivního prvku [V]
U_B	předpětí [V]
u_{VST}	vstupní napětí [V]
u_{VYST}	výstupní napětí [V]
X, Y, Y_1+, Y_2-, Y_3+	vstupní proudové či napěťové brány prvků GCC, MO-CF a UCC
$Z, Z_1+, Z_1-, Z_2+, Z_2-$	výstupní proudové či napěťové brány prvků GCC, MO-CF a UCC

SEZNAM PŘÍLOH

SEZNAM PŘÍLOH	73
A PŮVODNÍ ZNÁMÉ OBVODY	74
A.1 První původní obvod	74
A.2 Druhý původní obvod.....	77
B NAVRHOVANÉ OBVODY S UCC.....	80
B.1 První navrhovaný obvod s UCC	80
B.2 Druhý navrhovaný obvod s UCC.....	85
C CD	89

A PŮVODNÍ ZNÁMÉ OBVODY

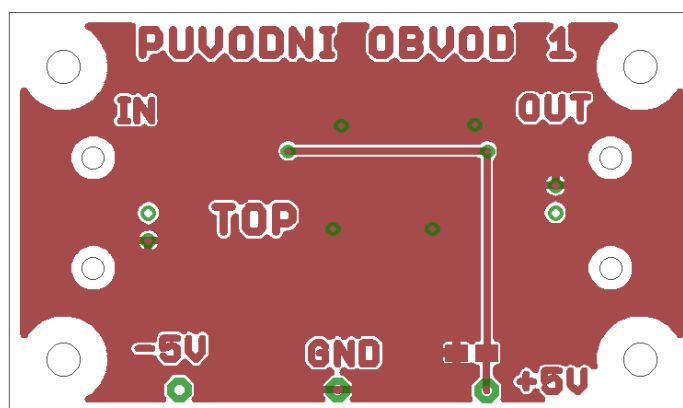
A.1 První původní obvod



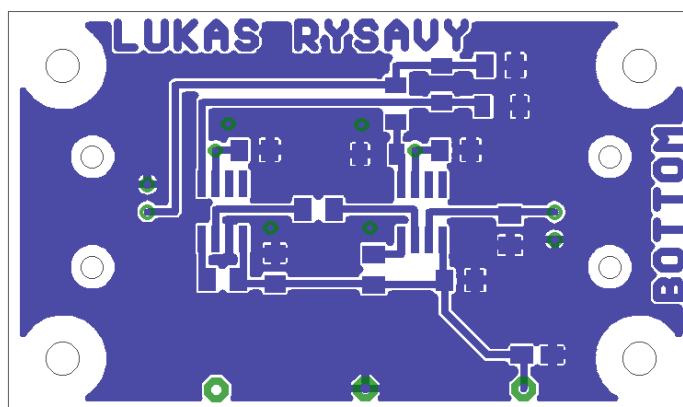
Obr. A.1: Schéma vysokofrekvenčního přesného dvoucestného usměrňovače se dvěma proudovými konvejory převzatého z [16].

Tab. A.1: Soupis použitých součástek v prvním původním obvodu

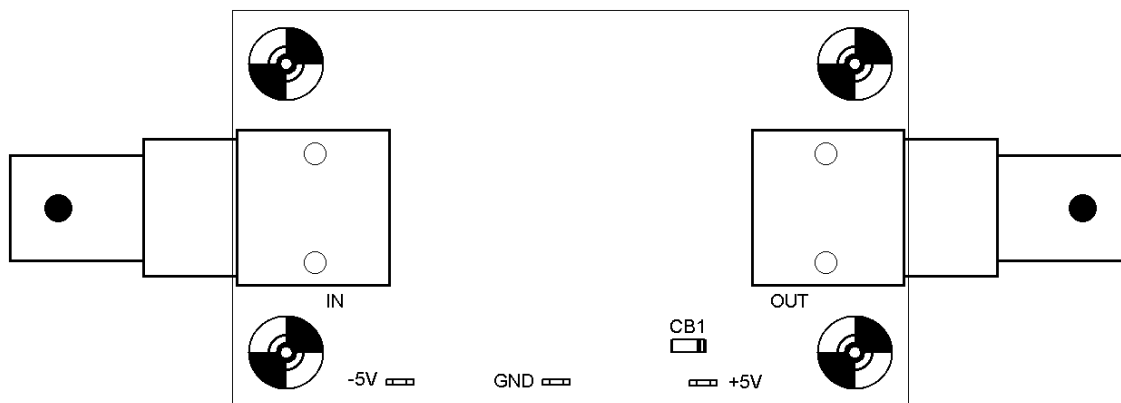
Prvek	Hodnota	Pouzdro
CB1	4u7	A/3216-18R
CB2	4u7	A/3216-18R
CB3	100n	1206
CB4	100n	1206
CB5	100n	1206
CB6	100n	1206
D1	1N4148	MINIMELF
D2	1N4148	MINIMELF
D3	1N4148	MINIMELF
D4	1N4148	MINIMELF
IN	BNC	do dps
OUT	BNC	do dps
OPA1	OPA861	SO8
OPA2	OPA861	SO8
R1	1k	1206
R2	1k	1206
R3	270	1206
R4	270	1206
RIN	51	1206



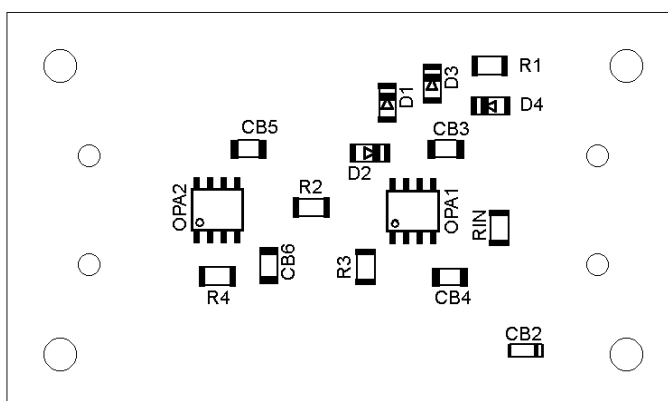
Obr. A.2: Obráz spojů na straně top.



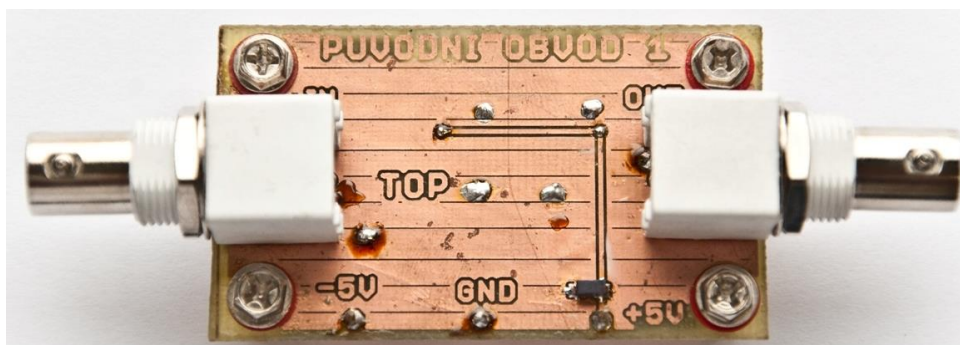
Obr. A.3: Obráz spojů na straně bottom.



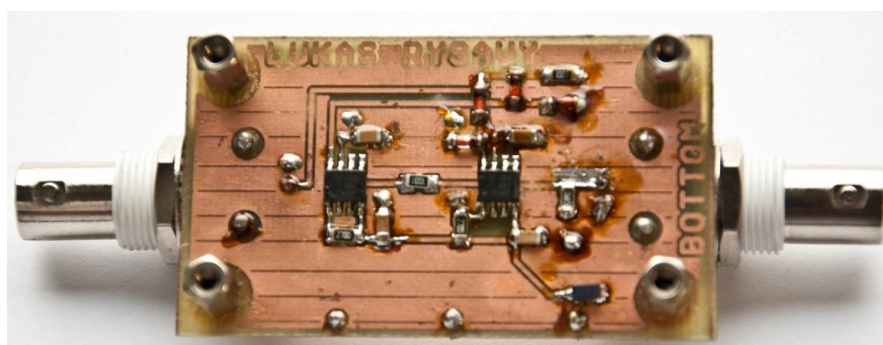
Obr. A.4: Rozložení součástek na straně top.



Obr. A.5: Rozložení součástek na straně bottom.

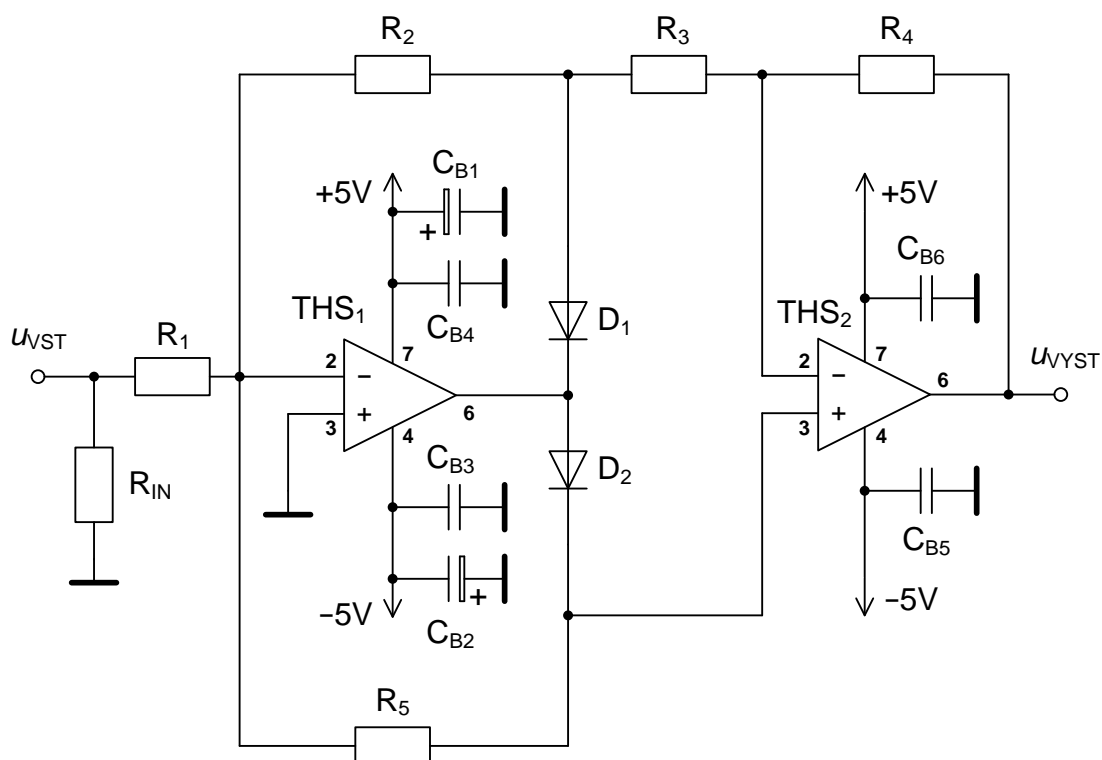


Obr. A.6: Fotografie finálního přípravku na straně top.



Obr. A.7: Fotografie finálního přípravku na straně bottom.

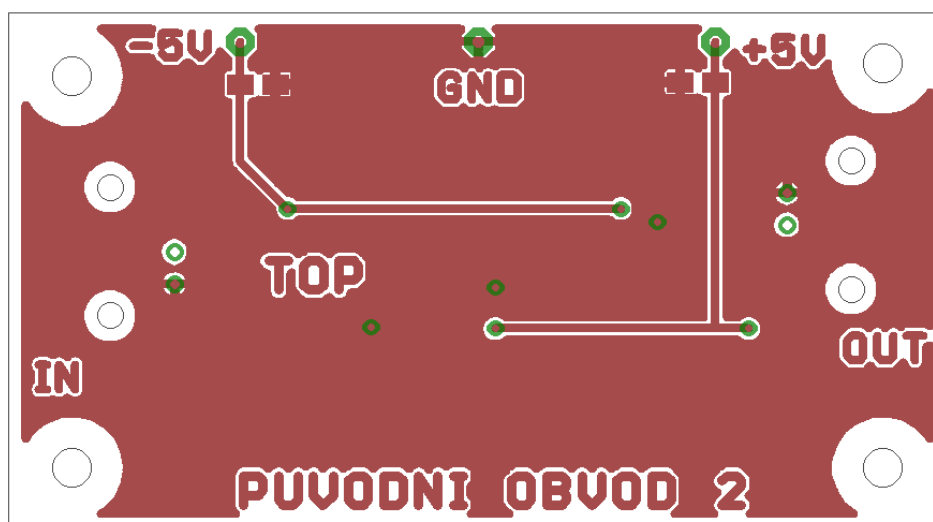
A.2 Druhý původní obvod



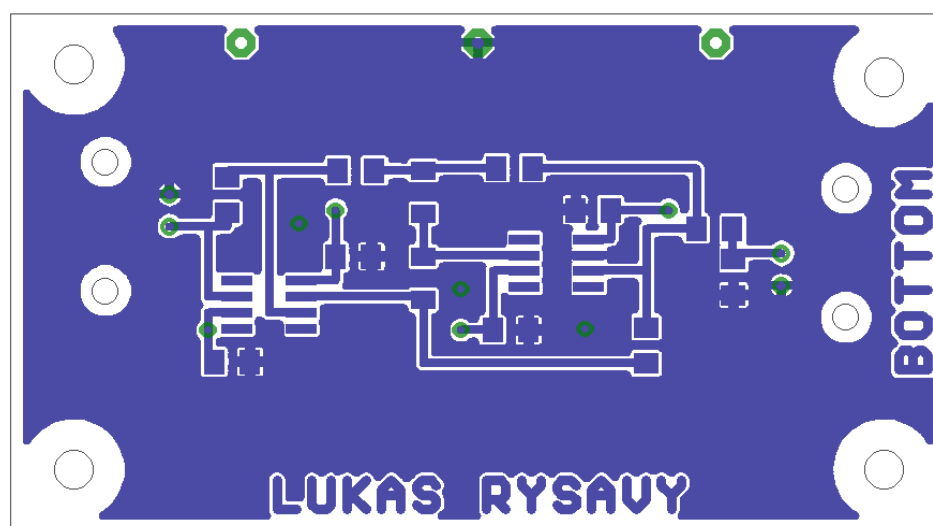
Obr. A.8: Schéma přesného dvoucestného usměrňovače se dvěma OZ převzatého z [5].

Tab. A.2: Soupis použitých součástek v prvním původním obvodu

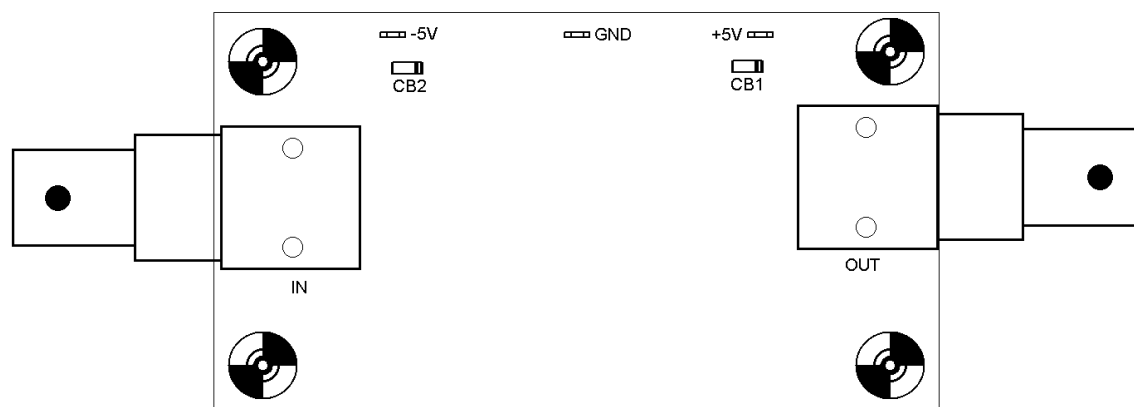
Prvek	Hodnota	Pouzdro
CB1	4u7	A/3216-18R
CB2	4u7	A/3216-18R
CB3	100n	1206
CB4	100n	1206
CB5	100n	1206
CB6	100n	1206
D1	1N4148	MINIMELF
D2	1N4148	MINIMELF
IN	BNC	do dps
OUT	BNC	do dps
R1	1k1	1206
R2	1k3	1206
R3	1k	1206
R4	1k	1206
R5	1k3	1206
RIN	51	1206
THS1	THS4051ID	SO8
THS2	THS4051ID	SO8



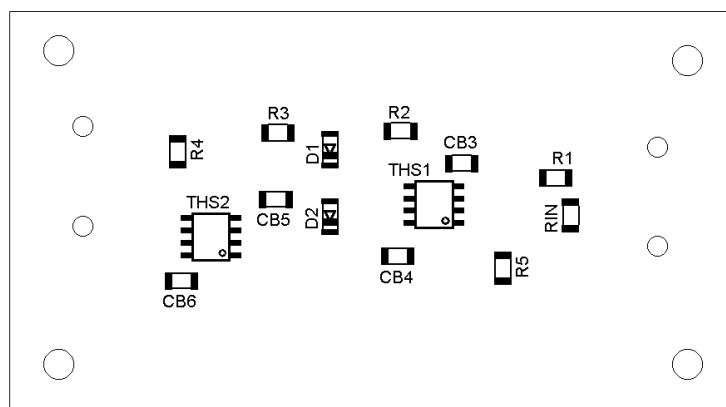
Obr. A.9: Obráz spojů na straně top.



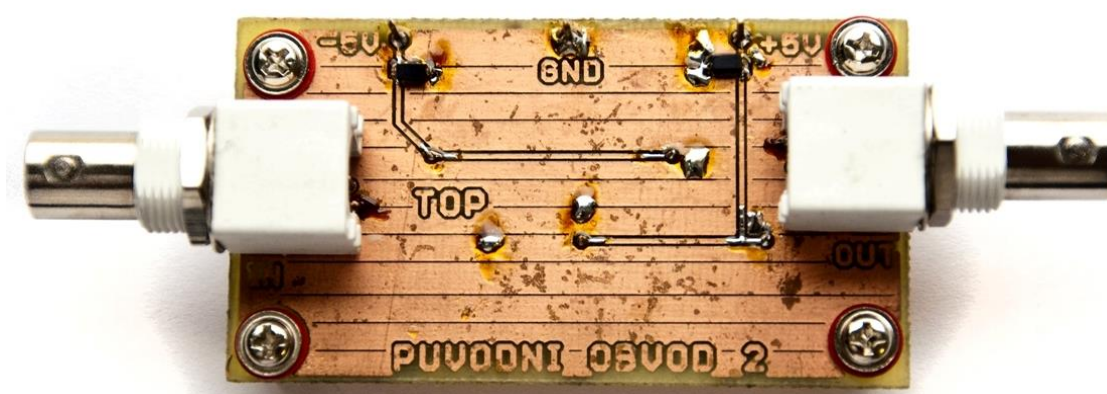
Obr. A.10: Obráz spojů na straně bottom.



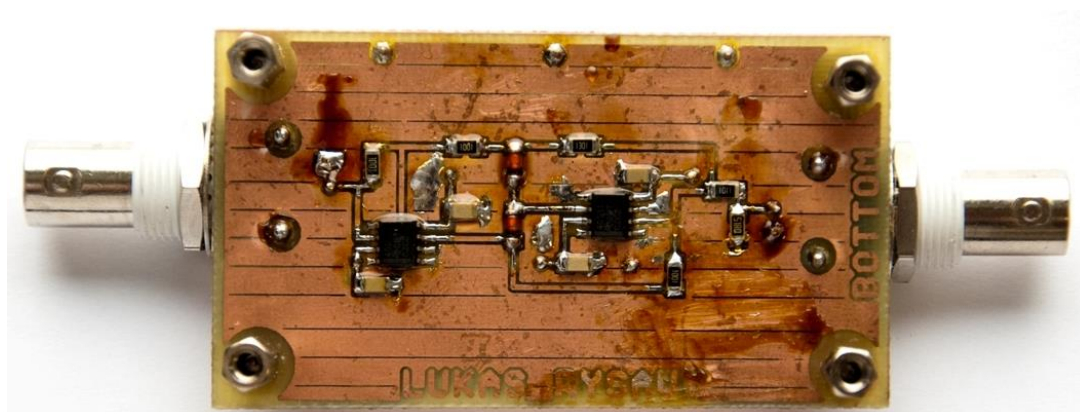
Obr. A.11: Rozložení součástek na straně top.



Obr. A.12: Rozložení součástí na straně bottom.



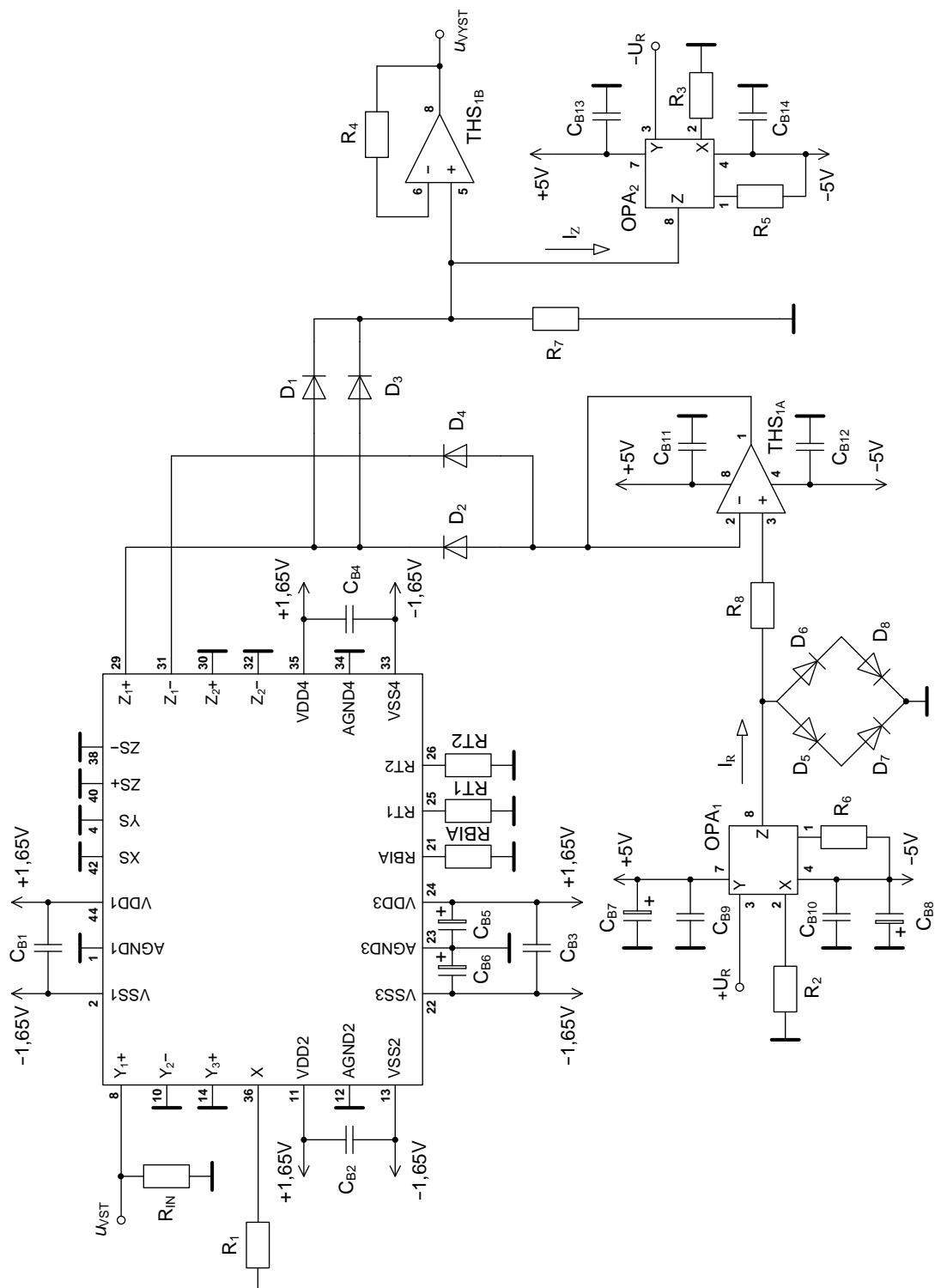
Obr. A.13: Fotografie finálního přípravku na straně top.



Obr. A.14: Fotografie finálního přípravku na straně bottom.

B NAVRHOVANÉ OBVODY S UCC

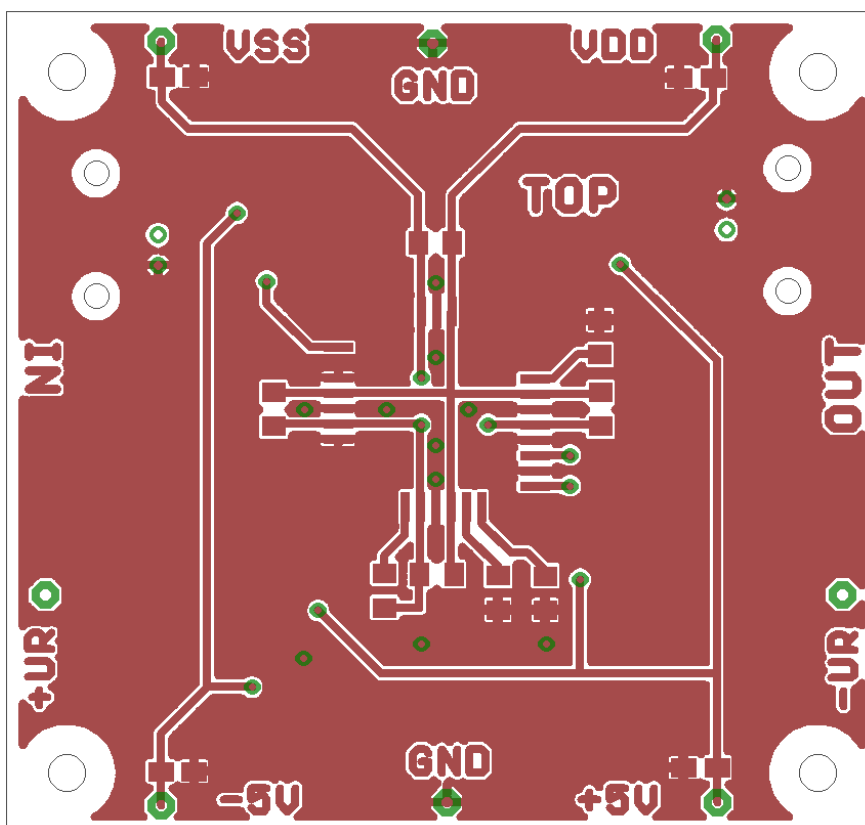
B.1 První navrhovaný obvod s UCC



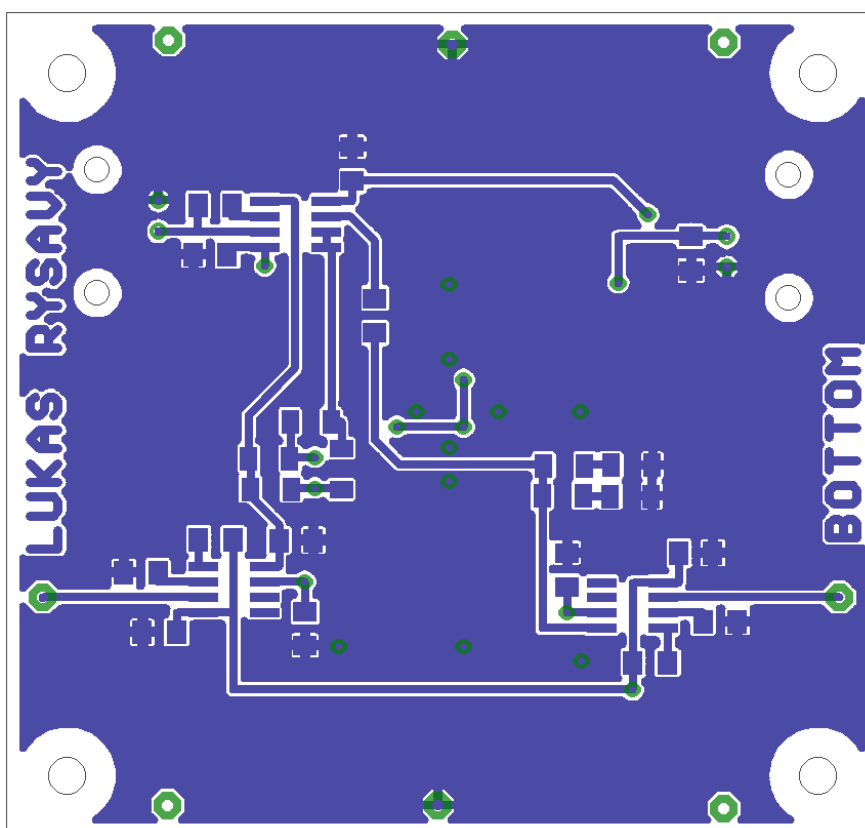
Obr. B.1: Schéma prvního navrhovaného obvodu s UCC.

Tab. B.1: Soupis použitých součástek v prvním původním obvodu

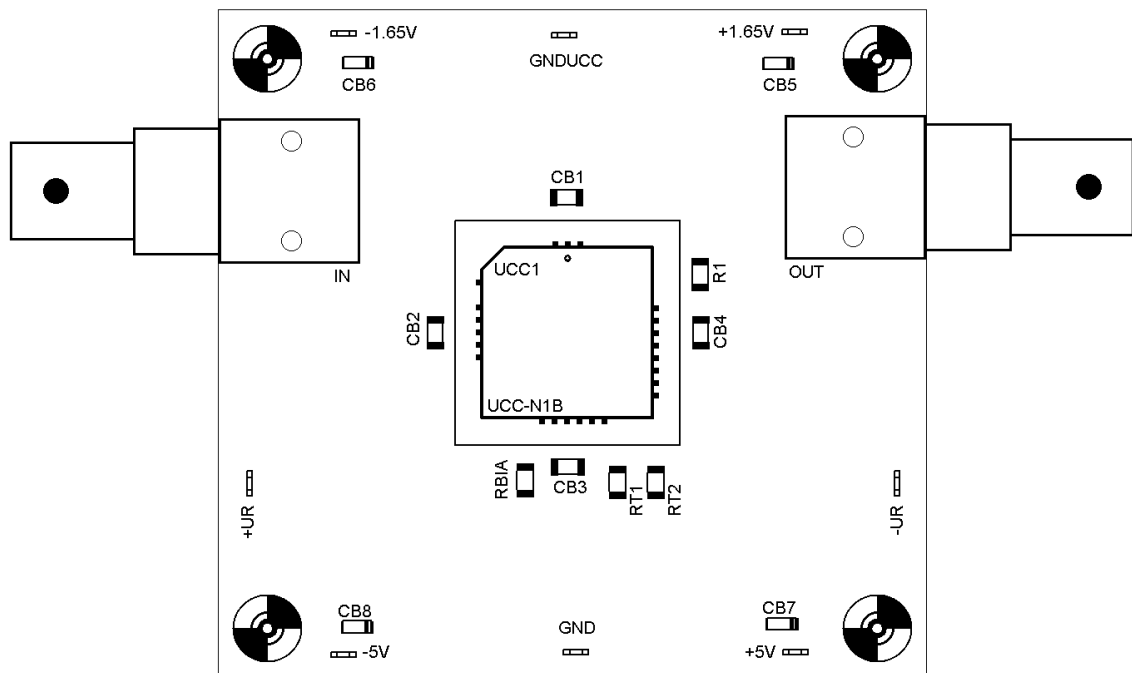
Prvek	Hodnota	Pouzdro
CB1	47n + 68p	1206
CB2	47n + 68p	1206
CB3	47n + 68p	1206
CB4	47n + 68p	1206
CB5	4u7	A/3216-18R
CB6	4u7	A/3216-18R
CB7	4u7	A/3216-18R
CB8	4u7	A/3216-18R
CB9	100n	1206
CB10	100n	1206
CB11	100n	1206
CB12	100n	1206
CB13	100n	1206
CB14	100n	1206
D1	1N4148	MINIMELF
D2	1N4148	MINIMELF
D3	1N4148	MINIMELF
D4	1N4148	MINIMELF
D5	1N4148	MINIMELF
D6	1N4148	MINIMELF
D7	1N4148	MINIMELF
D8	1N4148	MINIMELF
OPA1	OPA861	SO8
OPA2	OPA861	SO8
IN	BNC	do dps
OUT	BNC	do dps
R1	1k	1206
R2	30k	1206
R3	30k	1206
R4	1k	1206
R5	270	1206
R6	270	1206
R7	1k	1206
R8	1k	1206
RBIA	4k7	1206
RIN	51	1206
RT1	8k2	1206
RT2	8k2	1206
THS1	THS4052CD	SO8
UCC1	UCC-N1B 520	PLCC44



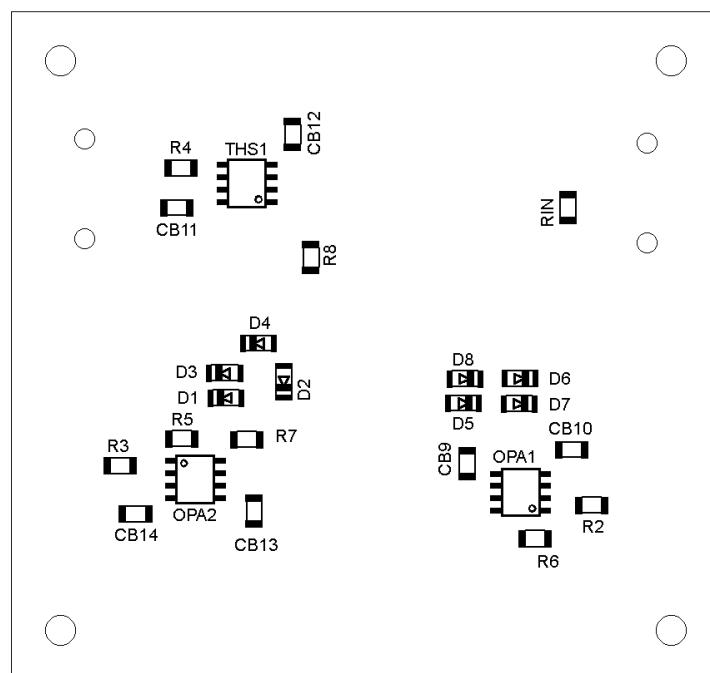
Obr. B.2: Obrázek spojů na straně top.



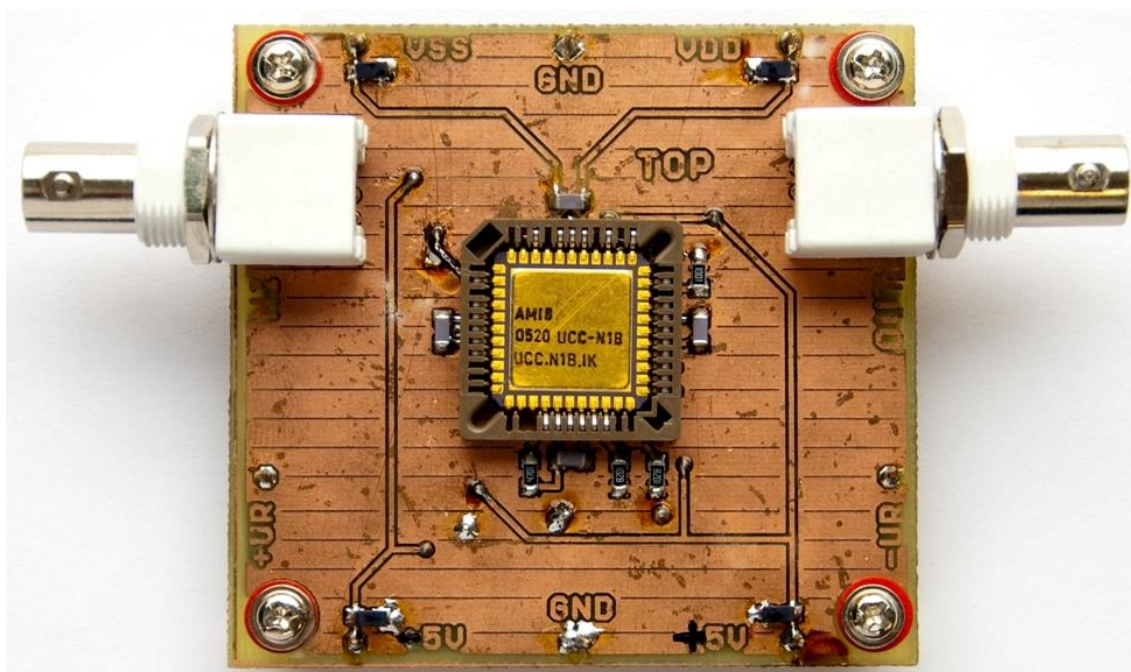
Obr. B.3: Obrázek spojů na straně bottom.



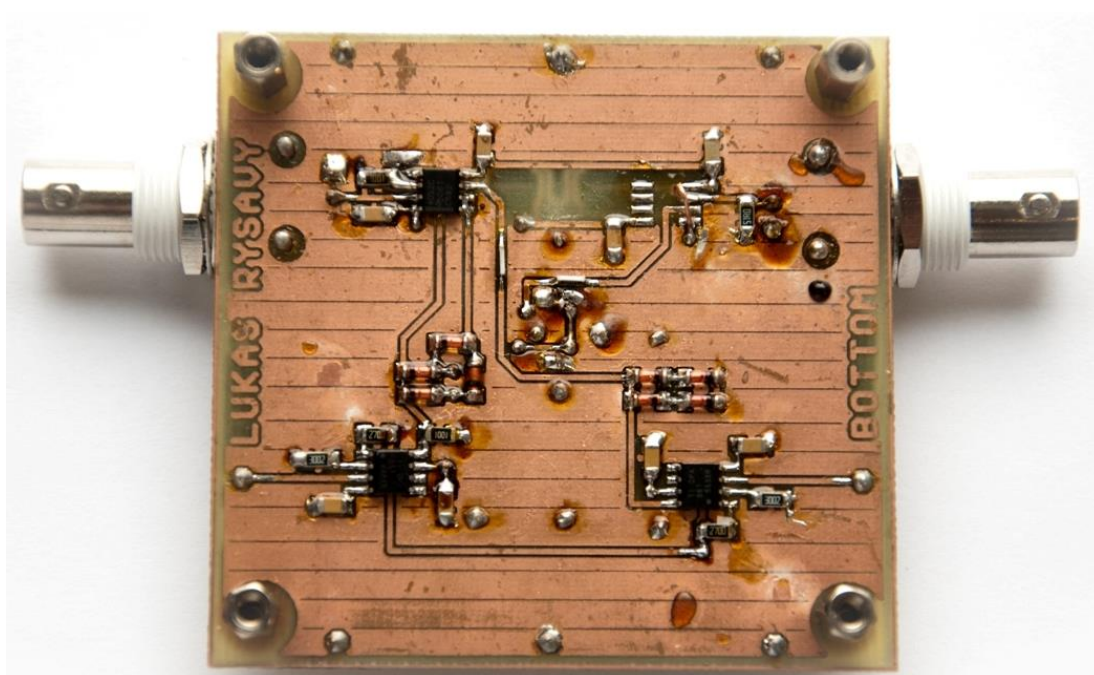
Obr. B.4: Rozložení součástek na straně top.



Obr. B.5: Rozložení součástek na straně bottom.

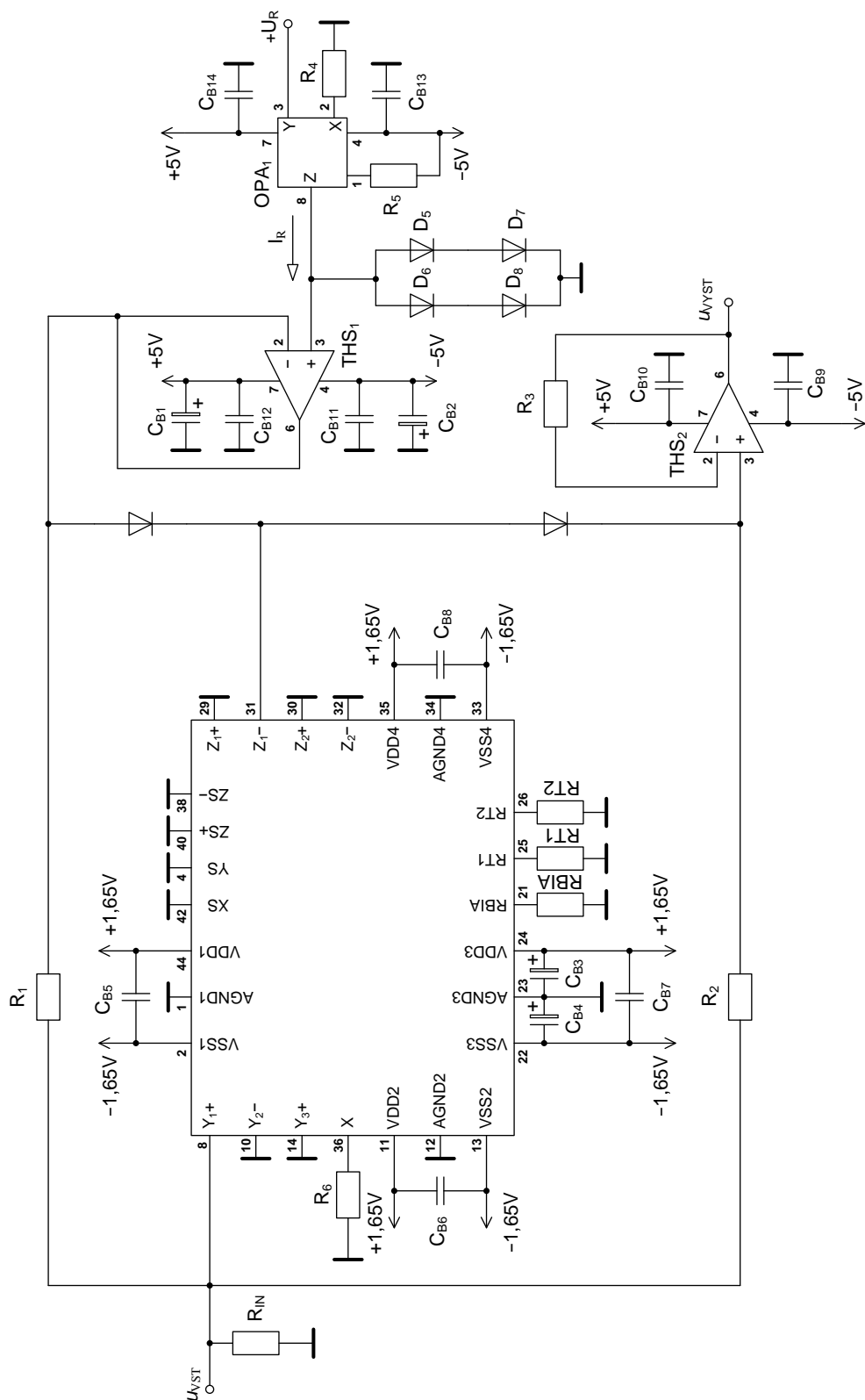


Obr. B.6: Fotografie finálního přípravku na straně top.



Obr. B.7: Fotografie finálního přípravku na straně bottom.

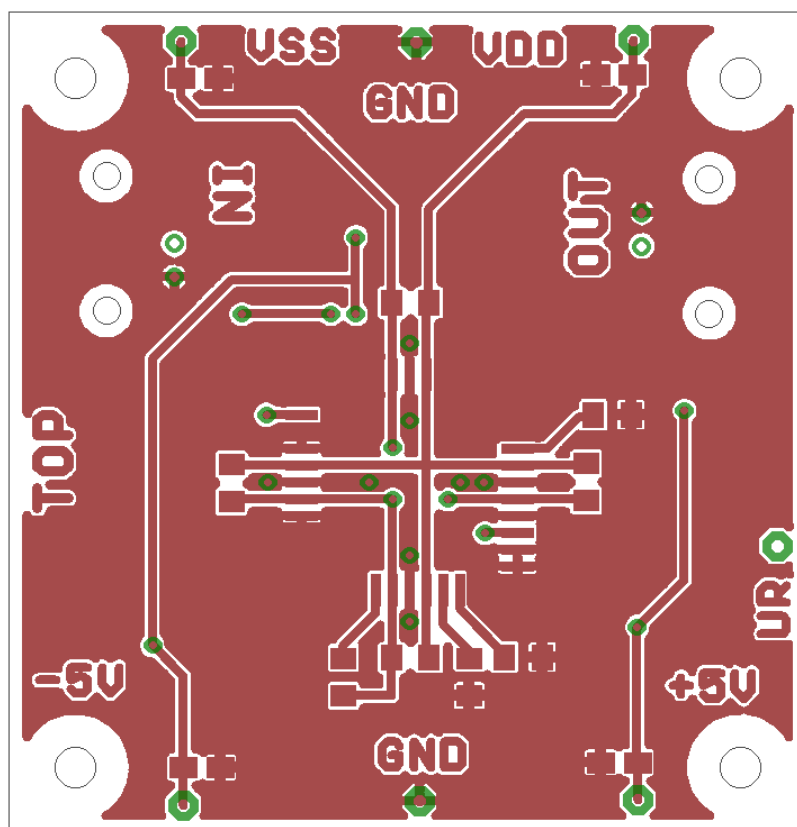
B.2 Druhý navrhovaný obvod s UCC



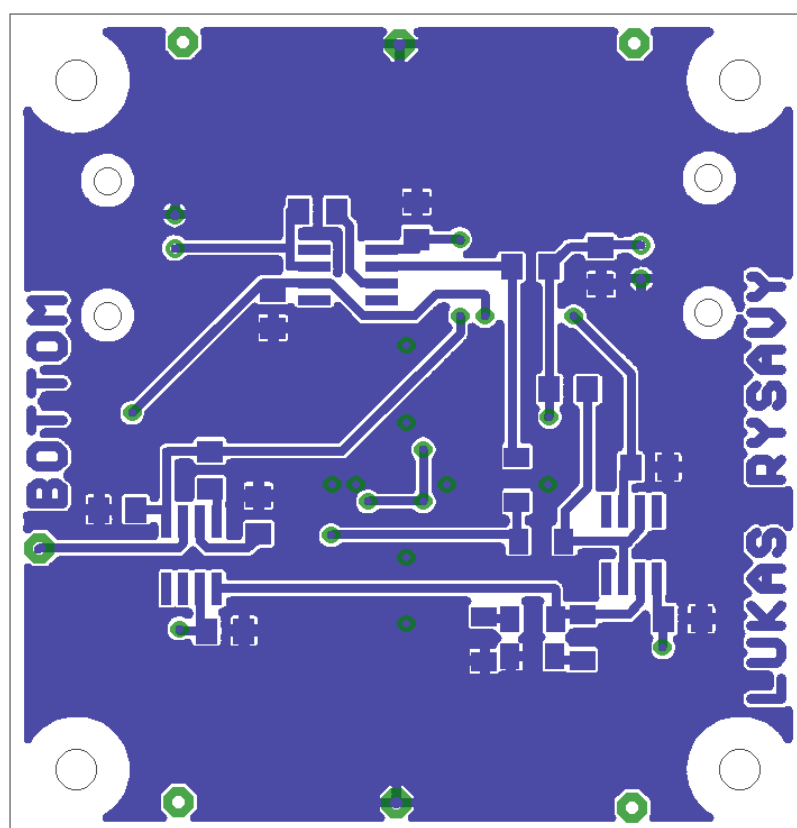
Obr. B.8: Schéma druhého navrhovaného obvodu s UCC.

Tab. B.2: Soupis použitých součástek v prvním původním obvodu

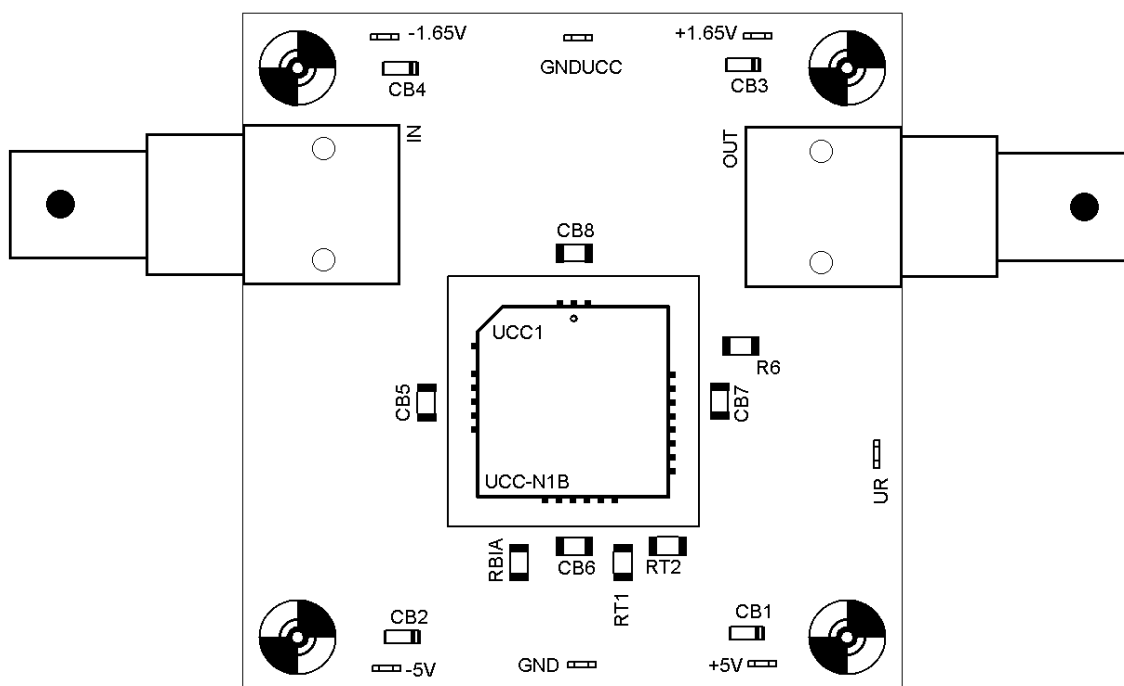
Prvek	Hodnota	Pouzdro
CB1	4u7	A/3216-18R
CB2	4u7	A/3216-18R
CB3	4u7	A/3216-18R
CB4	4u7	A/3216-18R
CB5	47n + 68p	1206
CB6	47n + 68p	1206
CB7	47n + 68p	1206
CB8	47n + 68p	1206
CB9	100n	1206
CB10	100n	1206
CB11	100n	1206
CB12	100n	1206
CB13	100n	1206
CB14	100n	1206
D1	1N4148	MINIMELF
D2	1N4148	MINIMELF
D3	1N4148	MINIMELF
D4	1N4148	MINIMELF
D5	1N4148	MINIMELF
D6	1N4148	MINIMELF
OPA1	OPA861	SO8
IN	BNC	do dps
OUT	BNC	do dps
R1	2k	1206
R2	1k2	1206
R3	1k	1206
R4	30k	1206
R5	270	1206
R6	510	1206
RBIA	4k7	1206
RIN	51	1206
RT1	8k2	1206
RT2	8k2	1206
THS1	THS4051ID	SO8
THS2	THS4051ID	SO8
UCC1	UCC-N1B 520	PLCC44



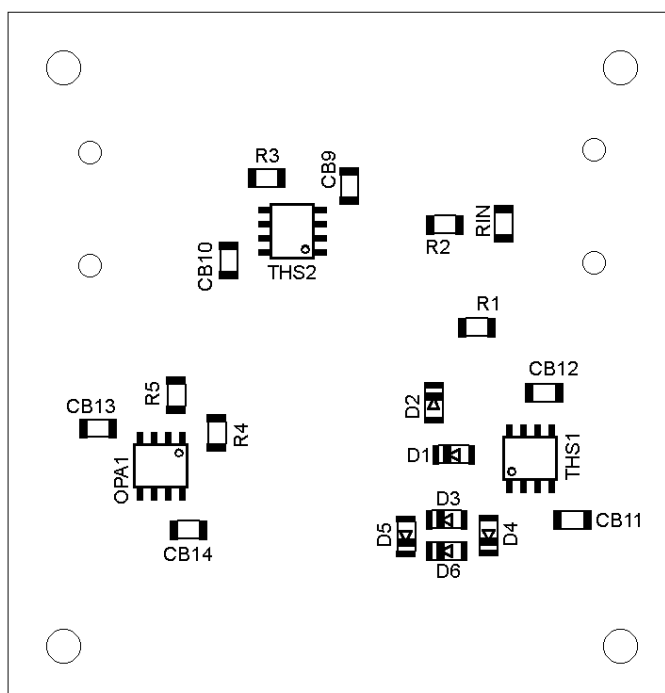
Obr. B.9: Obráz spojů na straně top.



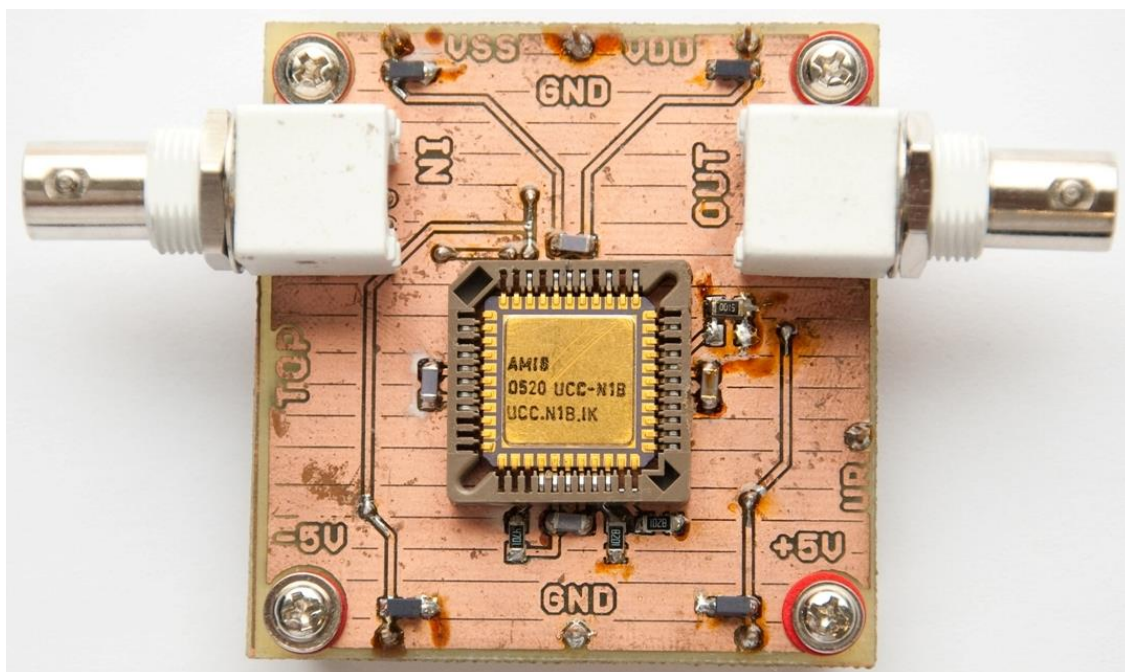
Obr. B.10: Obráz spojů na straně bottom.



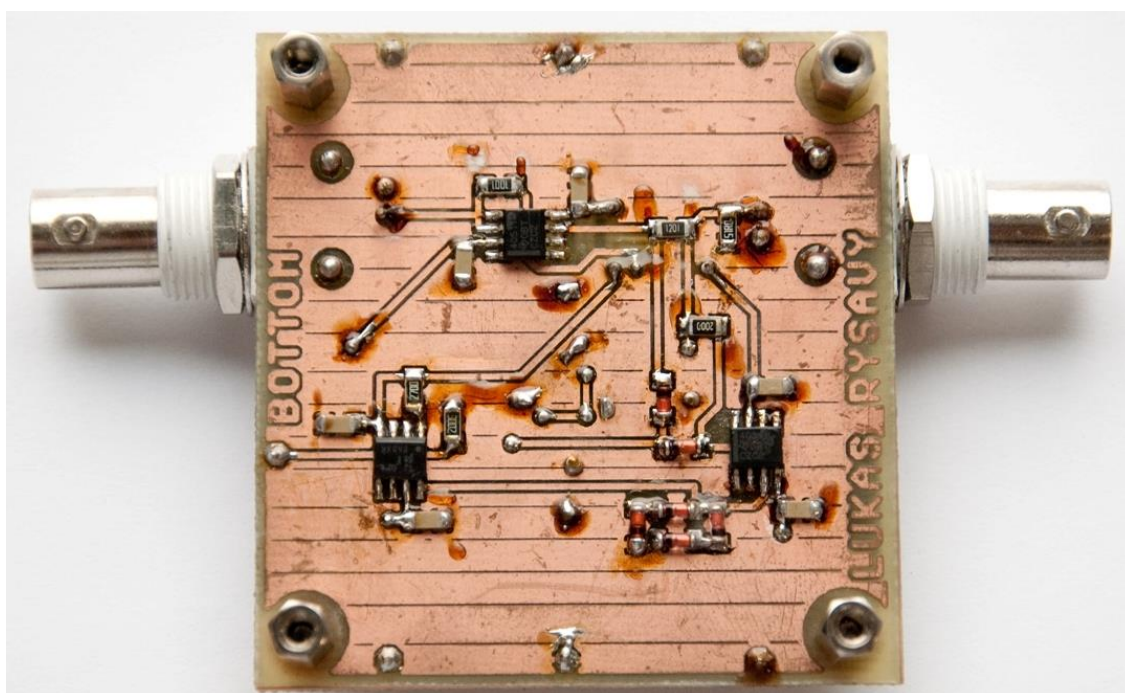
Obr. B.11: Rozložení součástek na straně top.



Obr. B.12: Rozložení součástek na straně bottom.



Obr. B.13: Fotografie finálního přípravku na straně top.



Obr. B.14: Fotografie finálního přípravku na straně bottom.

C CD